aacini
ASOCIACION ARGENTINA DE CARRERAS DE INGENIERIA INDUSTRIAL

COINI 2025

UCA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS

# XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Industrial

## Ingeniería Industrial y los desafíos del desarrollo

# Libro de ponencias

## Ejes temáticos del congreso:

Operaciones y logística

Gestión de las organizaciones, economía y toma de decisiones

Desarrollos tecnológicos industriales

Empresas de triple impacto

Educación en la ingeniería industrial

Trabajos de cátedras estudiantiles

**Mg. Ing. Alejandro Mohamad**
Presidente COINI 2025

**Dr. Ing. Mario Lurbé**
Presidente AACINI

**Lic. M. Laura Gallegos**
Secretaria AACINI

**XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Industrial – COINI 2025**

*"Ingeniería Industrial y los desafíos del desarrollo"*

# Libro de Ponencias

Compilador:

***Jorge Alejandro Mohamad***

Mohamad, Jorge Alejandro
Libro de ponencias XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Industrial: COINI 2025: ingeniería industrial y los desafíos del desarrollo / Jorge Alejandro Mohamad; Compilación de Jorge Alejandro Mohamad. –1ª ed.– Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Universidad Católica Argentina, 2026.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-950-44-0138-4

1. Ingeniería. 2. Ingeniería Industrial. 3. Congreso. I. Mohamad, Jorge Alejandro, comp. II. Título.
CDD 600



**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD CATÓLICA ARGENTINA**

A. M. de Justo 1400 • P.B., Contrafrente • (C1107AAZ)
0810-2200-822 Int.1177 • educa@uca.edu.ar
Av. Alicia Moreau de Justo 1400
Planta Baja - Contrafrente
Campus Papa Francisco - Buenos Aires, mayo 2026

ISBN: 978-950-44-0138-4

Queda hecho el depósito que previene la Ley 11.723
Printed in Argentine - Impreso en la Argentina

El presente Libro de Ponencias del XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Industrial –COINI 2025- es la publicación de las actividades académicas desarrolladas durante el Congreso los días 30 y 31 de octubre de 2025 en el Campus Papa Francisco, sede Puerto Madero de la Pontificia Universidad Católica Argentina, y organizado por la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias de dicha universidad y la Asociación Argentina de carreras de Ingeniería Industrial (AACINI).

Este es un espacio académico y profesional de la Ingeniería Industrial para la presentación y publicación de investigaciones que aporten originalidad desde perspectivas científico-técnicas y educativas. Este evento busca fomentar la creatividad, la innovación y el emprendimiento, así como promover el debate y la divulgación de experiencias que contribuyan al desarrollo de la especialidad a nivel nacional e internacional. Dirigido a académicos, investigadores, empresarios, y profesionales del sector, el COINI ofrece un espacio para el intercambio de conocimientos y la generación de sinergias.
El COINI también ofrece la tradicional Reunión Anual de los miembros de la AACINI, Directores, Coordinadores y responsables académicos de las carreras Ingeniería Industrial tanto del ámbito nacional como internacional, y los delegados de la AArEII (Asociación Argentina de Estudiantes de Ingeniería Industrial y carreras afines), de manera de proporcionar el espacio adecuado para el intercambio entre profesores, directores y estudiantes.

Ejes Temáticos:

1. Operaciones y Logística
2. Gestión de las Organizaciones, Economía y Toma de Decisiones
3. Desarrollos Tecnológicos Industriales
4. Empresas de Triple Impacto
5. Educación en la Ingeniería Industrial
6. Trabajos de Cátedras Estudiantiles (Solo para estudiantes)

Autoridades del COINI 2025:

Presidente Honorario: MBA. Ing. José Mostany

Presidente: MSc. Ing. Alejandro Mohamad

Vicepresidente: Dr. Ing. Mario Lurbé

Coordinación General y Logística: MBA. Ing. Federico Colombo – Ing. Eduardo Chidichimo

Comunicación y Relaciones Institucionales: Esp. Lic. María Laura Gallegos

Comité Científico, Evaluaciones y Publicaciones**:**

Presidente: Mag. Ing. Antonio Morcela

Coordinadores de los Ejes Temáticos:

1. Operaciones y Logística: Mag. Ing. Federico Arribas Medrano
2. Gestión de las Organizaciones, Economía y Toma de Decisiones: Mag. Ing. Julián Vela
3. Desarrollos Tecnológicos Industriales: Dra. Mónica Miralles
4. Empresas de Triple Impacto: Dr. Ing. Gustavo Giuliano
5. Educación en la Ingeniería Industrial: Esp. Lic. María Laura Gallegos
6. Trabajos de Cátedras Estudiantiles (Solo para estudiantes): Ing. Victoria Donofrio

Presentación

En el XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Industrial –COINI 2025- nos propusimos como lema “Ingeniería Industrial y los desafíos del desarrollo”. Con este lema queremos sintetizar la importancia que tiene la carrera a nivel nacional e internacional en el desarrollo integral de la sociedad y las naciones.

Al hablar de desarrollo integral estamos englobando tanto el crecimiento económico como la inclusión de las personas de toda la sociedad en condiciones de trabajo digno y de calidad que les permita desplegar todo su potencial en un entorno de equidad que preserve los recursos naturales y el medio ambiente.



Jornada 1 - Acto de Apertura
Ing. Mohamad, Presidente COINI 2025.

Desde esta perspectiva de desarrollo integral equitativo, los profesionales de la ingeniería industrial asumen un papel protagónico que los conduce a enfrentar innumerables desafíos: el desafío de diseñar y liderar cadenas de suministros de bienes y servicios cada vez más competitivas e integradas a nivel nacional e internacional, el desafío de la creación de puestos de trabajo inclusivos y de calidad sosteniendo la capacitación y empleabilidad de las personas, el desafío de la incorporación continua de nuevas tecnologías en este advenimiento de la inteligencia artificial, el desafío de preservar los recursos naturales y energéticos en el cuidado de la “casa común” que nos alberga como humanidad y el desafío de generar riqueza que se distribuya de manera justa entre todos los integrantes de los sistemas productivos.

La formación académica de nuestras carreras de ingeniería industrial contempla e incorpora en sus planes de estudio y actividades curriculares todos estos desafíos enumerados a través de una formación por competencias que no solo busca la incorporación de los saberes, sino también las habilidades prácticas del saber hacer y las habilidades personales, sociales y actitudinales del saber ser.

En esta XVIII edición del COINI queremos manifestar el compromiso de toda la comunidad de la ingeniería industrial en asumir los desafíos para el desarrollo entendiendo que no hay nación sin desarrollo industrial propio y sólidamente constituido.

MSc. Ing. Jorge Alejandro Mohamad

Director de la carrera Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias de la Universidad Católica Argentina

Presidente del COINI 2025

**Resumen de las actividades del Congreso**

Durante la primera Jornada del Congreso (Jueves 30 de octubre de 2025) se desarrollaron las siguientes actividades plenarias:

1. Conferencia del Dr. Ing. Juan Carlos González Sánchez, ex director de R&D de Tenaris S.A., sobre el tema "Gestión de la Innovación en la Industria". En esta charla se ilustró sobre el caso exitoso de una empresa argentina de alta tecnología metalúrgica en la innovación de productos de clase mundial –tubos sin costura para la industria del petróleo y gas- a través de su centro de investigación y desarrollo en Campana.
2. Panel de empresarios bajo el título de "Industria en Argentina: Una mirada de los industriales", con la participación del Lic. Teddy Karagozian, de la empresa TN Platex, la Ing. Luján Barbieri, de la empresa AD Barbieri, y la Ing. Cynthia Patejim, de la empresa Patejim S.R.L. Como desafíos que ellos perciben destacamos la valoración de la formación de recursos humanos universitarios para incrementar la innovación tecnológica, la importancia de políticas públicas e infraestructura para mejorar la competitividad y la logística, y la función que tienen las universidades en formar ingenieros industriales en una cultura de desarrollo industrial nacional.



Jornada 1
Acto de Apertura
Decano Ing. José Mostany.



Jornada 1 - Expositores

3. "Jornada Internacional de la Mujer en la Ingeniería Industrial", con la participación de las Ingenieras Clarisa Alejandrino, Darina Boychenko, Felicitas Garzarón, Georgina Cattaneo, Paloma Martínez, Tamara Pardieux, María Fernanda Pérez Prieto, Ludmila Rodríguez y Lucila Romero, coordinadas por la Ingeniera Claudia Zárate y la Dra. Mónica Miralles. A través de los testimonios de las expositoras de la Jornada se pudo avanzar en el camino, cada vez más intenso, de inclusión de las mujeres en el ejercicio de esta profesión.





Jornada 1 - Jornada Internacional de la Mujer en la Ingeniería Industrial

Durante la segunda Jornada del Congreso (Viernes 31 de octubre de 2025) se desarrollaron las siguientes actividades plenarias:

1. Conferencia sobre el tema “Infraestructura de la Calidad”, brindada por los Ingenieros Cristian Vázquez y Silvina Suzuki, de IRAM –Instituto Argentino de Normalización y Certificación-. Además de entender cómo funcionan los procesos para desarrollar nuevas normas y estándares de calidad, y actualizar las existentes, esta conferencia transmitió la apertura a la comunidad académica para participar en los equipos que llevan a cabo estas actividades.



Jornada 2 - Conferencia IRAM

2. Conferencia “Sector de la Industria Energética”, ofrecida por la Ing. Victoria Sabbioni, de Compañía General de Combustibles –CGC-. El vector energético es esencial para el desarrollo industrial de toda nación. Bajo este concepto, esta charla ilustró acerca de las perspectivas del sector tanto en energías convencionales como el alto potencial de energías renovables.
3. Conversatorio sobre “Nuevas Tecnologías e IA en la Industria”. El Ing. Marcelo Pelayo, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora y consultor de PyMEs, y el Ing. Paulo Strina, Socio fundador de la empresa Motion AI, conversaron e intercambiaron perspectivas acerca de las posibilidades de adopción de las nuevas tecnologías basadas en Inteligencia Artificial en las industrias argentinas, como así también la gran importancia que tiene la transformación de la cultura organizacional en las empresas y la capacitación del capital humano ante este nueva realidad.



Jornada 2 - Conversatorio sobre IA en la Industria.

Con este recorrido de conferencias y conversatorios se trató poner sobre la mesa de debate el objetivo del COINI 2025, identificado en su lema “Ingeniería Industrial y los desafíos del desarrollo”.




Reunión de la AACINI y Directores de carrera Ingeniería Industrial




Jornada 2 - Acto de Cierre del COINI 2025














Ponencias de la UCA.



# Eje 1
# Operaciones y Logística

# DEL MODELO AL MEJOR RESULTADO: SIMULACIÓN PROCESOS PRODUCTIVOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA FABRICACIÓN DE AUTOPARTES

Fiori Laorden, Luca; Odetto, Fabio M..; Fornari, Javier
lucafiori.lfl.11@gmail.com; fabio.odetto@frra.utn.edu.ar ;
javier.fornari@frra.utn.edu.ar

*UTN Facultad Regional Rafaela, Universidad.*
*correo@frra.utn.edu.ar*

RESUMEN

En la actualidad, los procesos de manufactura a nivel global enfrentan desafíos significativos vinculados con la productividad, el aprovechamiento de recursos y la eficiencia temporal. Diversos estudios nacionales e internacionales han demostrado que estos factores impactan directamente en la competitividad y sustentabilidad de las industrias, particularmente en el contexto de economías en desarrollo. A nivel nacional, se ha evidenciado que muchas pequeñas y medianas industrias no cuentan con los recursos necesarios para implementar herramientas tradicionales de mejora continua, como estudios de tiempos, análisis de layout o estudios del trabajo, debido a los altos costos, tiempos requeridos y limitaciones en la disponibilidad de personal capacitado. Frente a esta problemática, la simulación por eventos discretos se presenta como una alternativa eficiente y accesible. Esta herramienta permite modelar digitalmente procesos productivos, simular distintos escenarios operativos y analizar variables críticas sin interferir en el entorno real de producción. Como resultado, se facilita la identificación de cuellos de botella, el análisis de capacidad, y la evaluación de propuestas de mejora con bajo costo y alto impacto. En función de esta situación, se propone la implementación de una herramienta de simulación por eventos discretos en una empresa autopartista de la región. El objetivo es analizar el proceso de fabricación y armado de una cruceta, identificar oportunidades de mejora en el flujo de trabajo, y proponer soluciones viables para optimizar la eficiencia operativa del sistema productivo.

Palabras Claves: Estudio de Trabajo, Manufactura, Autopartes, Simulación de procesos, Optimización.

ABSTRACT

Currently, manufacturing processes at a global level face significant challenges related to productivity, resource utilization, and time efficiency. Various national and international studies have shown that these factors directly impact the competitiveness and sustainability of industries, particularly in the context of developing economies. At the national level, it has been observed that many small and medium-sized industries lack the necessary resources to implement traditional continuous improvement tools, such as time studies, layout analysis, or work studies, due to high costs, time requirements, and limitations in the availability of trained personnel. In response to this issue, discrete-event simulation emerges as an efficient and accessible alternative. This tool enables the digital modeling of production processes, the simulation of different operational scenarios, and the analysis of critical variables without interfering with the real production environment. As a result, it facilitates the identification of bottlenecks, capacity analysis, and the evaluation of improvement proposals at low cost and high impact. Based on this situation, the implementation of a discrete-event simulation tool is proposed for an auto parts manufacturing company in the region. The objective is to analyze the manufacturing and assembly process of a universal joint, identify opportunities for improvement in the workflow, and propose viable solutions to optimize the operational efficiency of the production system.

Keywords: Work Study, Manufacturing, Auto Parts, Process Simulation, Optimization.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se enfrentan desafíos sin antecedentes en el sector de la industria automotriz y autopartista, los cuales son generados por la creciente complejidad de los procesos productivos, la intensificación a nivel mundial de la competencia y la necesidad imperativa de optimizar recursos con el fin de mantener la competitividad en mercados altamente dinámicos (Porter, 1990; James P. Womack, 2007).

A escala internacional, exigencias crecientes en términos de flexibilidad, calidad y tiempos de entrega son impuestas a los fabricantes de autopartes, mientras que la incorporación de tecnologías avanzadas es requerida con el fin de mejorar los procesos productivos y reducir los costos operativos (Kleijnen J. P., 2015; Banks, Discrete-Event System Simulation (5th ed.), 2010). Como consecuencia, la necesidad de que las metodologías de análisis de los sistemas productivos sean adoptadas de modo que puedan implementarse mejoras sin interrumpir la producción real ha sido planteada (Law, 2015).

En el ámbito nacional, variaciones constantes en la disponibilidad de insumos y presiones económicas particulares son experimentadas por la industria autopartista argentina, lo que afecta la eficiencia y la continuidad de la producción (INTI, 2021). Niveles óptimos de competitividad y productividad no son alcanzados por muchas pymes del sector, viéndose limitada su capacidad de respuesta ante un mercado globalizado y exigente (CEPAL, 2020).

En el contexto local, operaciones realizadas por empresas del rubro son llevadas a cabo en un entorno industrial con capacidad limitada y fuertes restricciones de recursos, y reelaboraciones son presentadas en la producción de componentes clave como las crucetas, impactando de manera negativa los tiempos y costos de producción (Cámara de Industriales Metalúrgicos de Rafaela y Región, 2020).

Como respuesta, la simulación por eventos discretos (DES) ha sido posicionada como una herramienta tecnológica fundamental que permite que los sistemas productivos sean modelados, analizados y optimizados sin la necesidad de interrumpir las operaciones reales. Su efectividad ha sido ampliamente comprobada en la identificación de cuellos de botella, la evaluación de escenarios operativos y implementación de mejoras que pueden resultar en incrementos significativos de productividad con beneficios que abarcan de costos hasta mejoras en la eficiencia de producción (Pacheco, 2021; Skoogh, 2022; Schranz, 2023). Para las organizaciones del sector automotriz, este enfoque ha sido considerado de alto valor debido a la precisión y complejidad que demandan los procesos productivos (Banks, Discrete-event system simulation, 2010).

En el presente trabajo, la implementación del software Anylogic será propuesta en una empresa autopartista de la región. El modelado digital del sistema productivo será realizado, y diversos escenarios operativos serán evaluados, de manera que el funcionamiento de la empresa pueda ser recopilado mediante la simulación, utilizando como base de datos recolectados ya analizados durante múltiples visitas efectuadas en el marco de la asignatura de Estudio del Trabajo. Cabe mencionar que Anylogic ha sido reconocido como uno de los principales softwares de simulación multimetodo (eventos discretos, dinámica de sistemas y basado en agentes) y es utilizado por una amplia variedad de empresas de renombre muy importantes (AnyLogic Company, 2025)

Dentro de las variables de análisis, una profundización en aspectos clave como el flujo productivo, la utilización de recursos y la capacidad instalada será llevado a cabo, ya que estos son considerados factores fundamentales para impulsar mejoras sustanciales en la competitividad y eficiencia de la empresa (Kleijnen J. P., 2008). De este modo, se espera que cambios significativos y sostenibles sean generados a lo largo del tiempo, posibilitando no solo la optimización del desempeño operativo, sino también el fortalecimiento de la posición competitiva de la organización a nivel nacional e internacional.

Es importante destacar que en la empresa se encuentran dos plantas físicamente separadas, una planta de producción y una planta de tratamientos térmicos, las cuales están ubicadas a una distancia de 4,3 km entre sí, condición por la cual el modelo realizado es directamente afectado.

## CONTEXTO DE LA INDUSTRIA

El presente estudio es situado en el contexto de la manufactura autopartista, en el cual la producción de una cruceta es llevada a cabo a través de múltiples etapas críticas, tales como corte, perforado y rectificado. La simulación de estos procesos es comprendida como la modelación de entidades que son representadas por piezas, las cuales son procesadas en estaciones de trabajo, bajo la exigencia de tiempos aleatorios y recursos limitados.

Para el caso desarrollado, un modelo de simulación de eventos discretos (DES) fue implementado en el software Anylogic (The AnyLogic Company, 2025). La DES es reconocida como una técnica de modelado informático y dinámico que es utilizada para representar y analizar sistemas de alta complejidad cuyo comportamiento es determinado por eventos que ocurren en instantes específicos de tiempo.

Mediante la representación explícita de recursos, eventos y entidades, el funcionamiento de procesos reales es replicado por esta metodología, las restricciones operativas son identificadas, y el impacto de distintas variables, decisiones o condiciones sobre el desempeño global del sistema es evaluado.

Dentro de las variables consideradas en el análisis, se profundiza en el estudio de tres indicadores clave del sistema productivo. El tiempo de stock en proceso (Work in Process Time) es definido como el periodo durante el cual la unidad de trabajo permanece dentro del sistema productivo en estado de procesamiento parcial antes de continuar con la siguiente etapa. Este tiempo es representado en el software por la duración que las unidades permanecen alojadas en colas o estaciones de trabajo antes de ser procesadas completamente (AnyLogic, 2025)

El tiempo de entrega (Lead Time) es entendido como el intervalo que transcurre desde el momento en que la unidad es introducida en el proceso productivo hasta que es retirada completamente. Este indicador es utilizado para evaluar la eficiencia de las operaciones y es considerado una métrica fundamental para la optimización de los sistemas de manufactura, debido a que refleja el desempeño integral de las etapas involucradas en la producción (Chwif, 2015; AnyLogic, 2025).

La cantidad procesada por unidad de tiempo (Troughput) es definida como el número de unidades de trabajo completadas y liberades del sistema productivo por en una unidad temporal especifica. Esta métrica es representada por unidades procesadas y registradas durante intervalos de tiempo determinados, lo cual permite que la capacidad operativa y el rendimiento del sistema sean evaluados y optimizados dentro del modelo de simulación. (AnyLogic, 2025).

La integración de estas métricas en el modelo de simulación permite que el desempeño global del sistema sea evaluado de manera precisa y que escenarios alternativos sean analizados, ayudando a la identificación de cuellos de botella, la reducción de tiempos improductivos y la mejora de eficiencia operativa. En primer lugar, se define una entidad (Entity) que se representa como un objeto que fluye a través del sistema simulado como un producto, cliente o documento, el cual puede poseer atributos y desencadenar eventos. En segundo término, se delimita un recurso (Resource) representado por un elemento del sistema que es necesario para ejecutar ciertas actividades o procesos, como puede ser un recurso humano o una máquina, donde la disponibilidad y la asignación de estos condicionan el rendimiento del sistema.

Una condición que es considerada crítica para dichas variables es la presencia de un cuello de botella en un proceso productivo. Este es definido como el recuso, etapa o proceso dentro de un sistema que es restringido el flujo global, lo cual es relacionado con acumulaciones, diminuciones en el rendimiento y tiempos de espera elevados (Pérez-Cervera, 2024).En ese contexto, la Simulación por Eventos Discretos (DES o SED) ha sido considerada técnica fundamental para el análisis y optimización de procesos productivos, especialmente en el sector manufacturero (López-Castañeda, Metodologías para la simulación de eventos discretos en la manufactura, 2023; UAEH, 2025). En particular, en la industria autopartista, la eficiencia operativa y la reducción de los tiempos de ciclo son considerados factores esenciales para la competitividad. Por medio de la SED, los sistemas productivos son modelados, validados y optimizados, evitando que la operación real sea interrumpida durante el proceso de análisis. (Simio, 2025; López-Castañeda, Metodologías para la simulación de eventos discretos en la manufactura, 2023)

De manera consistente, ha sido evidenciado en literatura académica y en diversos casos de estudio industriales que la adopción de software DES es asociada con mejoras significativas en la productividad, eficiencia y reducción de costos operativos (Luz, 2017). En consecuencia, será presentada una revisión de estudios relevantes, mediante la cual será ilustrada la aplicación exitosa de estas tecnologías en diferentes sectores productivos.

En una aplicación práctica, en una empresa autopartista dedicada a la producción de turboalimentadores con actuador eléctrico, se observaron altas frecuencias de errores internos durante el ensamblaje, los cuales causaban trabajos correctivos, incrementos en los tiempos de producción y costos adicionales, e incluso daños irreparables en algunos productos. Para abordar esta situación, se implementó un modelo de simulación utilizando Tecnomatix Plant Simulation, mediante el cual se automatizó la sección crítica de la línea de ensamblaje entre estaciones 4 y 6, reemplazando

operaciones manuales por equipos de alta precisión. Como resultado se logró incrementar la producción anual de 89.575 a 98.139 unidades y se redujo el personal operativo en dicha sección de cuatro a tres trabajadores. (Albert Mares, Improving competitiveness of an assembly line by simulation based productivity increase – A case study, 2023).

De manera similar, en una empresa automotriz ubicada en Michigan, se enfrentaba un déficit de producción significativo que comprometía la satisfacción del cliente, al producirse únicamente 726 piezas cuando la demanda era de 1.400. Para abordar este desafío, se desarrolló un modelo de simulación con Arena, complementado con técnicas de Project Charter y Design of Experiments (DOE), mediante el cual se identificaron cuellos de botella, se optimizaron flujos de trabajo complejos y se estabilizaron los procesos de manufactura. Gracias a esta intervención, la producción aumentó a 14.161 unidades, superando ampliamente la demanda inicial y eliminando retrasos (Thomas, Ali, AlArjani, & Attia, 2022).

Por otra parte, en Beijing se analizaron problemas de eficiencia en una línea de producción de motores debido a la heterogeneidad de los trabajadores y a un ambiente de alta complejidad. Se construyo un modelo de simulación por eventos discretos que incorporo variables críticas tales como la variabilidad en el desempeño de los operarios, la presencia de un entorno productivo aleatorio y los efectos derivados de las curvas de aprendizaje y olvido, los cuales no eran considerados en los modelos de tradicionales de análisis. Posteriormente, se implementó un proceso de Decisión de Markov (MDP) para evaluar distintas políticas de programación y seleccionar la que optimizara la productividad de la línea. Como consecuencia, se lograron significativas mejoras en la eficiencia operativa, se redujeron los tiempos de inactividad y se aumentó la capacidad de producción sin comprometer la calidad del producto final. La aplicación de esta mitología permitió anticipar problemas potenciales y proponer soluciones que no afectaran la operación real, demostrando su utilidad para la toma de decisiones estratégicas (Feng, Fan, & Qin, 2013).

Asimismo, un proveedor de primer nivel del Reino Unido se enfrentaba a complicaciones en la gestión de recursos humanos y la planificación operativa dentro de la cadena de suministro automotriz. Para aplacar estas problemáticas, se implementó un modelo DES diseñado para capturar la complejidad de las operaciones del proveedor y permitir la evaluación de distintos escenarios de asignación de recursos y estrategias operativas. A través de la simulación, se detectaron cuellos de botella, se optimizó la distribución de tareas y se redujeron los retrabajos, lo que permitió alcanzar de manera consistente los objetivos de producción establecidos. Adicionalmente, el modelo brindó una herramienta consistente para la toma de decisiones, permitiendo anticipar impactos de cambios de demanda o en la disponibilidad de recursos, aumentando la capacidad de respuesta de la empresa ante la cadena de suministro. (M. Ramirez-Granados, 2014)

Finalmente, se ha evidenciado que los factores humanos ejercen un impacto determinante sobre los resultados de los modelos DES en la industria automotriz. En los modelos tradicionales, las variaciones naturales en el desempeño de los operarios no son consideradas adecuadamente, lo que genera diferencias significativas entre los resultados pronosticados y la operación real. Particularmente, factores como los ritmos cardíacos y las diferencias entre turnos afectan de manera considerable la eficiencia en las líneas de ensamblaje, donde las tareas manuales representan una gran parte del trabajo total. Para abordar esta limitación, se desarrolló un método técnico que permite recopilar datos temporales de las operaciones en la línea de ensamblaje, diferenciando los distintos periodos de cada turno y capturando la variabilidad del desempeño humano a lo largo del día. La aplicación de este método en un entorno industrial con alta participación de trabajo manual permitió comparar la producción entre turnos y comprobó que la consideración del factor humano mejora significativamente la precisión de los modelos de simulación, aproximando los resultados a la realidad operativa. Adicionalmente, la integración de estos factores en los modelos DES optimizo la exactitud predictiva del sistema, proporcionando información más consistente para la planificación de la producción y facilitar la toma de decisiones estratégicas basadas en datos realistas sobre el comportamiento del sistema productivo (Paiva, Montevechi, Miranda, & Pereira, 2017).

## METODOLOGÍA

En función de los objetivos planteados y de las variables críticas definidas en las etapas previas, se procedió al moldeado del sistema de producción de crucetas, con el fin de representar y analizar el comportamiento del proceso productivo. Este proceso metodológico permitió estructurar el sistema en fases claramente definidas, tal como se muestra en la figura 1, facilitando la evaluación de su desempeño y la identificación de oportunidades de optimización. Es importante destacar que el modelo

simulado es presentado como una versión simplificada del proceso de producción de crucetas, en la cual una sola máquina es utilizada para cada proceso.

Para la construcción del modelo, fue elegido el software de simulación por eventos discretos Anylogic, mediante el cual fue replicado el proceso completo de fabricación y ensamblaje de la cruceta junto con sus componentes (agujas, seguros, retenes, cubetas y cruces). Cabe destacar que únicamente las cubetas y las creces son procesadas dentro de la planta de producción, mientras que los demás componentes son adquiridos a proveedores externos en condiciones adecuadas para el ensamblaje. En el caso particular de las cubetas, su fabricación es realizada íntegramente a partir de barras de acero IRAM, hasta la obtención de la pieza final. Por otro lado, las cruces se adquieren ya conformadas, pero deben ser sometidas a procesos de acondicionamiento interno para lograr las especificaciones requeridas para el ensamblaje y posterior funcionamiento.

El proceso de modelado fue estructurado en tres etapas secuenciales.




*Figura 1. Etapas del modelado*

En la primera etapa, el proceso fue modelado a partir de un cursograma sinóptico elaborado con la información obtenida durante la visita realizada en el marco de la actividad de la cátedra de Estudio del trabajo, en el cual se registraron las operaciones, inspecciones y tiempos correspondientes al proceso. Asimismo, se documentó la descripción de cada operación e inspecciones correspondientes al proceso, obteniéndose 23 operaciones (debido a que las operaciones de tratamientos térmicos se unificaron para facilitar el modelado), 2 inspecciones y 1 ensamble. El flujo representado se detalla en la Tabla 1, donde se especifica el nombre de cada operación y una descripción, el elemento al que pertenece o si corresponde a un ensamble o armado. Los tiempos fueron volcados y adaptados en el modelo.

*Tabla 1 Tabla de tiempos cargados al modelo*

| Operación | Descripción | Elemento / Ensamble |
|---|---|---|
| O10 | Punteo de barras | Cubeta |
| O20 | Cortado de monedas | Cubeta |
| O30TT | Revenido | Cubeta |
| O40 | Fosfatizado | Cubeta |

| | | |
|---|---|---|
| O50 | Calibrado | Cubeta |
| O60 | Extrusión | Cubeta |
| O70 | Torneado | Cubeta |
| O80ao100TT | Cementación / Revenido / Granallado | Cubeta |
| O110 | Rectificado externo | Cubeta |
| O120 | Rectificado interno | Cubeta |
| O130 | Colocación de agujas | Agujas |
| O140 | Engrase de cubeta | Cubeta |
| O150 | Mecanizado exterior | Cruz |
| O160 | Perforado de centros | Cruz |
| O170 | Perforado de alemites | Cruz |
| O180 | Roscado de alemites | Cruz |
| O190aO210 | Recocido/ Cementado/ Revenido | Cruz |
| O220 | Rectificado de muñones | Cruz |
| O230 | Rectificado frontal | Cruz |
| O240 | Ensamble principal | Ensamble |
| O250 | Colocado de retenes | Armado |
| O260 | Colocado de seguros | Armado |
| O270 | Empaquetado | Armado |

Cabe destacar que se empleó la herramienta denominada “Source”, mediante la cual fueron creados los insumos iniciales, en el caso de las cubetas el insumo es una barra de hierro IRAM 5120, a partir de la cual se produce posteriormente la cubeta. En el caso de las cruces, el insumo inicial es una cruz preexistente que debe ser modificada para ajustarse a las especificaciones solicitadas. Mientras los seguros, retenes y agujas solo tienen un proceso de ensamble, debido a que se adquieren ya elaborados.

Las operaciones fueron modeladas mediante la herramienta “Service”, la cual permite parametrizar las características de cada proceso, incluyendo el tiempo requerido para su ejecución por unidad, la capacidad de espera disponible y la definición de los agentes que reciben y entregan el recurso. Destacándose particularmente aquellos elementos destinados a la planta de tratamientos térmicos, identificados mediante la sigla “TT” al final del nombre. Se entiende por agente el elemento que es transportado a lo largo del sistema, que es modificado y combinado (o ensamblado) con los demás agentes.

Por otra parte, fueron utilizadas las herramientas “Batch” y “Batch” para la conformación y desarme de lotes, así como “Queue” para la misma función, siendo parametrizadas sus características. Asimismo, fueron incorporados los elementos “Combine” y “Assembler” para la unión de componentes durante el proceso de ensamble del producto.

Durante esta fase fueron detectados cuellos de botella significativos en las operaciones “O30TTS” y “O190Ao210TTS” y O80ao100TT, donde se evidenciaron demoras relacionadas con la conformación de lotes, su transporte hacia la planta de tratamientos térmicos, la aplicación del tratamiento y su retorno a la planta de producción principal. Este problema fue solucionado mediante la generación de nuevos recursos en etapas determinadas del flujo, utilizando la herramienta “Source” para generar el stock del producto previamente trabajado en las actividades anteriores, y la herramienta “Queue” para mantener dicho stock, de manera que el sistema pudiera ser simulado sin que se produjera una acumulación de elementos que limitara la ejecución de la simulación.

Todas estas herramientas mencionadas son representadas en la Figura 2.

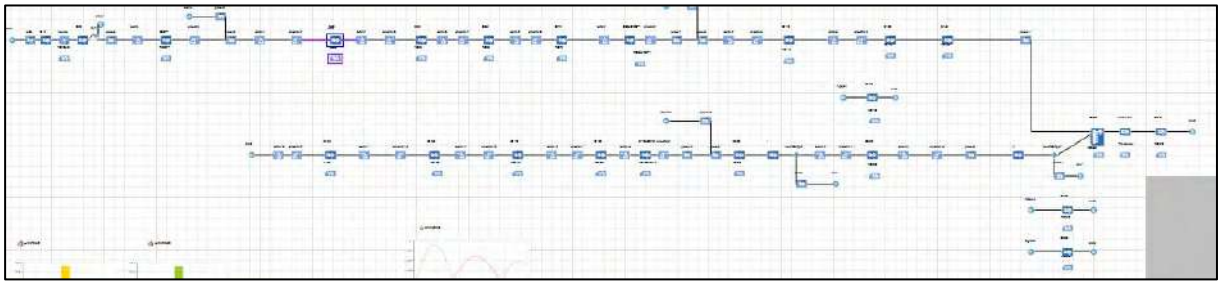


*Figura 2. Modelo realizado*

En la segunda etapa, los recursos humanos requeridos para cada operación fueron integrados al modelo mediante el uso del elemento “Resource Pool”, asignándose características y capacidades específicas a los operarios. Asimismo, fueron incorporadas gráficas que permitieron el análisis de los tiempos de stock en proceso, la cantidad de unidades procesadas por unidad de tiempo y el tiempo de entrega. Estas gráficas fueron generadas mediante la definición de una variable dentro del modelo, la cual fue configurada para circular por el sistema como un producto y realizar las mediciones correspondientes, implementándose este procedimiento mediante programación.

Mediante la incorporación de estos elementos, fue posibilitado un análisis de la manera en que la disponibilidad y el desempeño del personal inciden en la eficiencia global del sistema

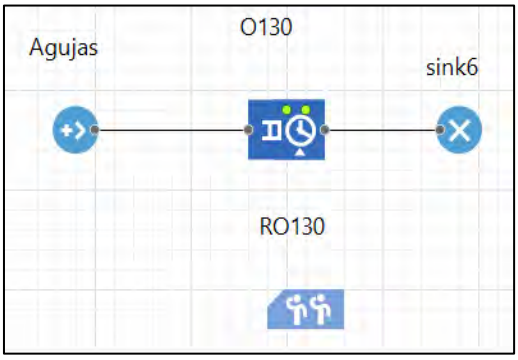



*Figura 3. Caso de aplicación de recursos humanos*

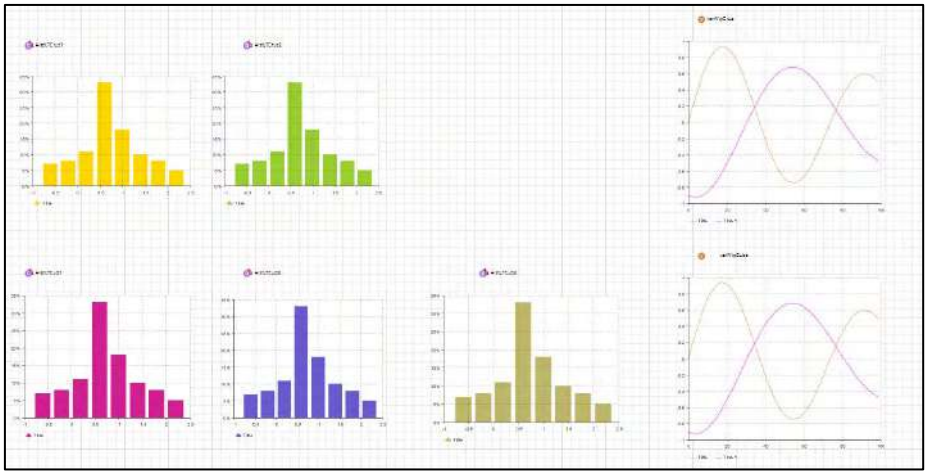


*Figura 4. Graficas de las variables criticas*

Finalmente, en la tercera etapa, el plano físico de la planta de producción fue integrado al modelo previamente desarrollado. Esta integración fue realizada mediante la herramienta 3D Window, la cual, a partir de un plano digital de la planta diseñado en AutoCAD, permitió generar una representación tridimensional del sistema productivo. En esta representación fueron incorporadas las máquinas y demás elementos correspondientes, logrando una visualización precisa de la disposición física de los recursos dentro de la planta. Representado en la figura 4

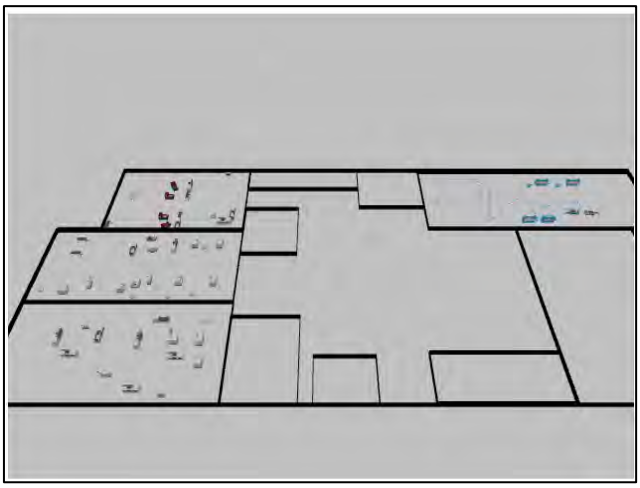


*Figura 4. Modelo 3D de la planta de producción*

Como conclusión del proceso de modelado en sus tres etapas fue generado el modelo final, en que se representaron de manera estructurada las interacciones entre los procesos productivos, el flujo de materiales y los recursos involucrados, permitiendo una visualización integral del sistema, Dicho modelo es representado en la figura 5.

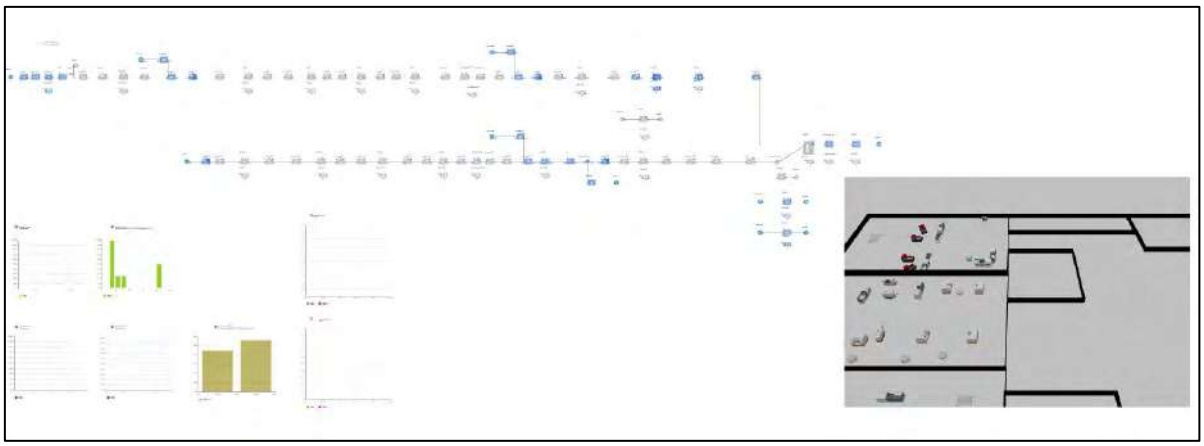


*Figura 5. Modelo completo*

RESULTADOS

En el modelo desarrollado, se identificó que la planta de tratamientos térmicos constituye el principal cuello de botella del sistema productivo, debido a que tanto las cubetas como las crucetas requieren aproximadamente 48 horas para completar su procesamiento. Esta condición genera un efecto directo sobre la planificación y la gestión del flujo de materiales, puesto que el transporte de productos hacia la planta demanda la disponibilidad de stock suficiente para garantizar la continuidad de las operaciones subsiguientes, limitación que se encuentra determinada por la capacidad del software de simulación, el cual únicamente permite modelar un máximo de 50000 unidades, constituyendo así una restricción para representar completamente el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de producción.

Tras la finalización de los tratamientos térmicos, se comprobó que la existencia de stock de piezas es crítica para evitar la interrupción de los procesos posteriores. Para modelar esta situación, fueron incorporados almacenes virtuales mediante las herramientas “Source” y “Queue” del software, configurando dos almacenes para el flujo de cubetas y uno para el flujo de cruces. De esta manera, la acumulación temporal de inventario fue representada y su impacto sobre la eficiencia global del sistema fue evaluado, permitiendo observar la relación directa entre stock, continuidad del proceso y desempeño operativo. Representado en la figura 6

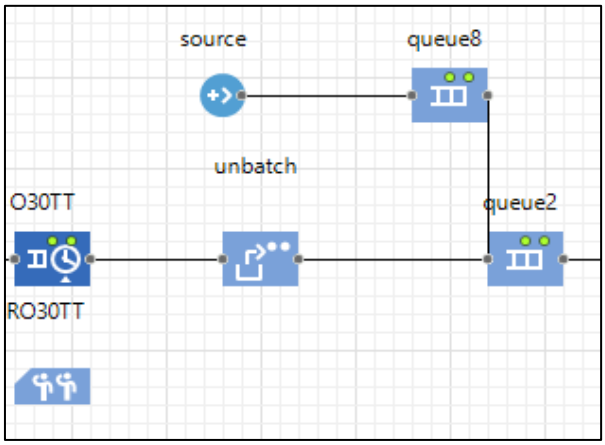



*Figura 6. Se realizo la corrección y soluciono el problema de stock*

Adicionalmente, se constató que la planificación de lotes de transferencia entre operaciones constituye un factor determinante para la eficiencia del flujo productivo. La conformación de lotes mediante la herramienta “Batch” fue implementada, asegurando que los productos lleguen a tiempo a las etapas siguientes y reduciendo tiempos improductivos asociados a retrasos y acumulación de materiales. Representado en la figura 7

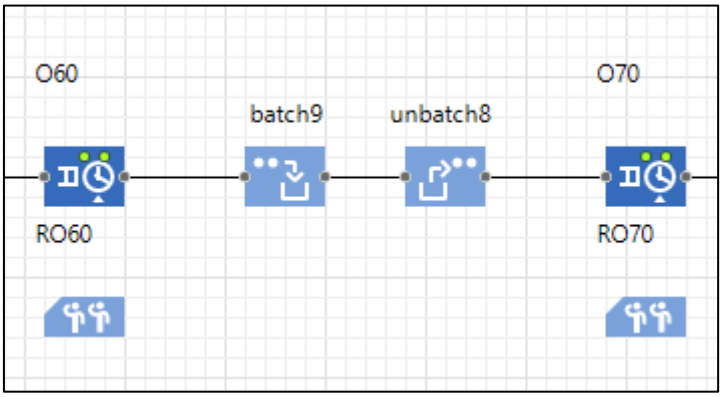



*Figura 7. Implementación herramienta “Batch” y “unbatch”*

El análisis de las gráficas de las variables críticas (stock en proceso, cantidad de unidades procesadas por unidad de tiempo y tiempo de entrega) evidenció los problemas previamente identificados: el cuello de botella en la planta de tratamientos térmicos, la acumulación excesiva de inventario y la variabilidad en la producción. Estas evidencias confirmaron las áreas críticas del sistema y fue justificada la necesidad de las acciones correctivas aplicadas

Mediante este análisis se demostró que la eficiencia del sistema depende de la gestión adecuada de stocks y lotes, así como la coordinación entre las plantas de producción y tratamientos térmico, evidenciando la importancia de la simulación por eventos discretos para la identificación de cuellos de botella, la evaluación de estrategias de mejora y la planificación de recursos en un entorno productivo complejo

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se modelo y simulo el sistema productivo de crucetas mediante eventos discretos, permitido identificar los principales cuellos de botella y evaluar la eficiencia de los procesos de fabricación y ensamblaje. Particularmente, se determinó que la planta de tratamientos térmicos representa el principal factor limitante del proceso productivo, dado que tanto las cubetas como las cruces requieren tiempos largos de procesamiento. Como resultado, se comprobó que la gestión adecuada de stocks y la planificación de lotes de transferencia constituyen elementos críticos para mantener la continuidad operativa y la eficiencia del sistema.

De esta manera se evidencio que la política actual de la empresa consiste en generar un stock elevado para justificar los viajes hacia la planta de tratamientos térmicos, implica la inmovilización de piezas, recursos financieros y espacio físicos, se propone como posible mejor la definición mas precisa del stock requerido posterior al tratamiento térmico, así como la evaluación de estrategias que permitan enviar lotes más pequeños con mayor frecuencia, asegurando la devolución oportuna y evitando interrupciones en el flujo de producción. Así como se sugiere, una posible reubicación de la planta de producción hacia la ubicación de la planta de tratamientos térmicos, con el objetivo de minimizar tiempos de transporte y optimizar la eficiencia del sistema.

De manera adicional, se sugiere que futuros trabajos se enfoquen en optimizar la planificación de lotes, ajustar dinámicamente los niveles de inventario y evaluar escenarios alternativos de transporte de plantas, generando la representación gráfica 3d correspondientes de estos escenarios, así como la del flujo de materiales dentro del grafico 3d.

De manera adicional, se sugiere que futuros trabajos se enfoquen en optimizar la planificación de lotes, ajustar dinámicamente los niveles de inventario y evaluar escenarios alternativos de transporte entre plantas, incorporando representaciones gráficas de dichos escenarios y visualizando el flujo de materiales dentro del modelo tridimensional.

## BIBLIOGRAFÍA


Albert Mares, D. S. (2023). Improving competitiveness of an assembly line by simulation based productivity increase – A case study. *Journal of Competitiveness*, 17. Obtenido de https://www.infobae.com/movant/2025/03/11/estrategias-y-desafios-del-abastecimiento-en-la-industria-automotriz/

Albert Mares, D. S. (2023). Improving Competitiveness of an Assembly Line by Simulation Based Productivity Increase – A Case Study. *Tomas Bata University in Zlín*, 43–62.

AnyLogic. (2025). *Material handling library*. Obtenido de The AnyLogic Company: https://anylogic.help/material-handling-library

AnyLogic Company. (2025). *AnyLogic Multimethod Simulation Software*. Obtenido de AnyLogic: https://www.anylogic.com/

Banks, J. C. (2010). *Discrete-Event System Simulation (5th ed.).* Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.

Banks, J. C. (2010). *Discrete-event system simulation.* Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.

Banks, J. C. (2010). *Discrete-event system simulation.* Upper Saddle River, NJ, Estados Unidos: Prentice Hall.

Cámara de Industriales Metalúrgicos de Rafaela y Región, I. R. (2020). *Observatorio Industrial de Rafaela - Cuarto Informe.* Rafaela, Santa Fe, Argentina: CCIRR (Centro Comercial e Industrial de Rafaela y la Región).

CEPAL, C. E. (2020). *La industria automotriz en América Latina: tendencias y desafíos.* Santiago de Chile: CEPAL.

Chwif, L. &. (2015). *Modelagem e simulação de eventos discretos.* Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier.

Feng, Y., Fan, W., & Qin, Y. (2013). A Discrete Event Simulation Based Production Line Optimization through Markov Decision Process. *Communications in Computer and Information Science (AsiaSim 2013)*, 385–390.

INTI, I. N. (2021). *Informe sector autopartista argentino.* Buenos Aires: INTI.

James P. Womack, D. T. (2007). *The Machine That Changed The World.* Nueva York, EE.UU.: Free Press.

Juan Manuel Silva, J. M. (2013). Modeling Human Factors in Discrete Event Simulation: A Case from the Automotive Industry. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 330–339.

Kleijnen, J. P. (2008). Design and analysis of simulation experiments. *European Journal of Operational Research*, 55-68.

Kleijnen, J. P. (2015). Simulation in manufacturing and logistics: theory and practice. *International Journal of Production Research*, 287–290.

Law, A. M. (2015). *Simulation Modeling and Analysis.* Nueva York: McGraw-Hill.

López-Castañeda, M. &.-A. (2023). Metodologías para la simulación de eventos discretos en la manufactura. *Boletín Científico ICBI*, 110-121.

López-Castañeda, M. &.-A. (2023). Metodologías para la simulación de eventos discretos en la manufactura. *Boletín Científico ICBI*, 110-121.

Luz, R. T. (2017). Simulación de eventos discretos en la planificación de producción para sistemas modulares. *Revista Técnica Facultad Ing. Luz*, 50-58.

M. Ramirez-Granados, J. H. (2014). A Discrete-event Simulation Model for Supporting the First-tier Supplier Decision-Making in a UK's Automotive Industry . *Journal of Applied Research and Technology* , 860-870.

Pacheco, C. M. (2021). Discrete-event simulation optimization: a survey. *European Journal of Operational Research*, 847-878.

Paiva, C. N., Montevechi, J. A., Miranda, R. d., & Pereira, T. F. (2017). Human factors in an automotive discrete event simulation model. *Acta Scientiarum. Technology*, 615-622.

Pérez-Cervera, J. M. (2024). Identificación y análisis de cuellos de botella en procesos productivos. *Ingeniería y Producción Journal*, 45-58.

Porter, M. E. (1990). *Competitive Advantage of Nations.* Nueva York, EE.UU.: Free Press.

Schranz, P. &. (2023). Leveraging discrete-event simulation for automotive production planning: challenges and opportunities. *Journal of Manufacturing Systems*, 453-468.

Simio. (2025). *Software de simulación de eventos discretos*. Obtenido de simio.com: https://www.simio.com/es/simulacion-de-sucesos-discretos/

Skoogh, A. &. (2022). Application of discrete-event simulation in manufacturing: A systematic literature review. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 102482.

The AnyLogic Company. (20 de Marzo de 2025). *AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solutions*. Obtenido de AnyLogic: https://www.anylogic.com/

Thomas, S. K., Ali, A., AlArjani, A., & Attia, E.-A. (2022). Simulation Based Performance Improvement: A Case Study on Automotive Industries. *International Journal of Simulation Modelling*, 405-416.

UAEH, U. A. (2025). Simulación de eventos discretos como estrategia para la optimización de procesos en la industria textil. *SAHAGÚN*, 35-47.

# SOSTENIBILIDAD EN EL TRANSPORTE TERRESTRE: MITIGACIÓN DE CO2 Y GESTIÓN DE RESIDUOS EN CAMIONES

**Director**: Ing. Mario C. Bonantini[1]

**Investigador**: *Ing. Augusto Giordano*[2]

**Institución académica**: Facultad de Ingeniería, Universidad del Salvador

**RESUMEN**

Esta investigación se centra en la "Sostenibilidad en el Transporte Terrestre: Mitigación de CO2 y Gestión de Residuos en Camiones" en Argentina, explorando estrategias innovadoras para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y desperdicios en el sector logístico durante el transporte terrestre. Se abordan las ventajas de la utilización de combustibles alternativos y la implementación de prácticas sostenibles para promover una logística más eficiente y ecológica. A través del análisis de datos secundarios y documentos relevantes, se identifican oportunidades clave y barreras para la adopción de soluciones de baja emisión. El estudio busca proporcionar visiones internas valiosas para empresas y descubrir cuales son aquellas prácticas sustentables aplicables al transporte por carretera que poseen mayor factibilidad de implementación en pequeñas y medianas organizaciones.

**Palabras Claves:** Logística sostenible; Reducción de emisiones de CO2; Combustibles Alternativos; Cadena de suministro verde; Eficiencia de energía.

**ABSTRACT**

This research focuses on 'Sustainability in Ground Transportation: CO2 Mitigation and Waste Management in Trucks' in Argentina, exploring innovative strategies to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and waste in the logistics sector during land transport. It addresses the advantages of using alternative fuels and implementing sustainable practices to promote more efficient and eco-friendly logistics. Through the analysis of secondary data and relevant documents, key opportunities and barriers for adopting low-emission solutions are identified. The study aims to provide valuable insights for companies and to discover which sustainable practices applicable to road transportation have the highest feasibility for implementation in small and medium-sized enterprises.

**Keywords:** Sustainable Logistics; CO2 emission reduction; Alternative fuels; Green supply chain; Energy efficiency.

## 1. INTRODUCCIÓN

La creciente conciencia global sobre el cambio climático ha posicionado a la sostenibilidad como una prioridad clave en diversos sectores industriales, siendo la logística uno de los principales focos de atención. El transporte y la distribución de mercaderías representan una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero, conocido como GEI[1], lo que subraya la necesidad de implementar prácticas más eficientes y sustentables en este ámbito.

En Argentina, un país en desarrollo con una economía dinámica y en crecimiento, la logística sostenible es un importante desafío y una oportunidad para promover el crecimiento industrial y la protección ambiental de manera simultánea. La transición hacia una economía baja en carbono es fundamental para asegurar la resiliencia y la competitividad a largo plazo de la región en el escenario global, haciendo que la investigación en la mejora de procesos industriales que permitan bajar las emisiones, un objetivo hoy más relevante y urgente que nunca.

Durante la investigación, es clave mantener presente que disminuir las emisiones de $CO_2$ resulta crucial, no solo para cumplir con los compromisos internacionales en materia de cambio climático, sino también para proteger los recursos naturales, promover la salud pública y garantizar un entorno seguro y rentable para nuestras próximas generaciones.

Este estudio se centra en la reducción de la huella de CO2 explorando estrategias y soluciones innovadoras para mitigar la contaminación sin comprometer la eficiencia y la rentabilidad de los transportes por carretera.

A pesar de los avances tecnológicos y las políticas ambientales implementadas en los últimos años, existe una brecha significativa en la implementación de prácticas sostenibles en el sector logístico argentino, lo que destaca la necesidad de investigaciones centradas en soluciones efectivas y aplicables. Es esencial implementar estas prácticas vanguardistas en un contexto como el nuestro, donde los recursos financieros son limitados y las innovaciones tecnológicas han enfrentado estancamiento con el tiempo. El objetivo principal de esta investigación es desarrollar y evaluar estrategias efectivas para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero durante los transportes terrestres utilizados en la logística, utilizando un enfoque multidisciplinario que integra la utilización de energías renovables y prácticas empresariales sostenibles.

A través de un análisis detallado de las prácticas actuales, las tecnologías emergentes y las políticas relevantes, este estudio busca identificar oportunidades clave y barreras durante los flujos de traslados terrestres en relación a la utilización de combustibles y manejo de desechos.

La validación de datos y la puesta en práctica se va a estar trabajando en conjunto a una empresa de movimiento de contenedores y cargas generales, la cual se encuentra en un importante proceso de cambio, tanto tecnológico como cultural, planteando una relación recíproca. De nuestro lado vamos a estudiar su proceso y reconocer mejoras, y de su lado nos van a compartir los informes de resultados validando así nuestra investigación.

## 2. Metodología y Procedimientos

El desarrollo se apoya en criterios normativos y evidencia técnica relevante. La metodología integrada combina una Revisión Bibliográfica, un Análisis Documental y el desarrollo de un Modelo Teórico para abordar de manera exhaustiva y rigurosa el objetivo principal de desarrollar estrategias efectivas para la reducción de emisiones de CO2 en la logística doméstica en Argentina. Por último se entrevistó a un especialista en la logística y prácticas sustentables con el fin de validar la información.

**Revisión Bibliográfica y Análisis Documental:** Este enfoque implica la recopilación y revisión sistemática de la literatura existente relacionada con la logística sostenible, la reducción de emisiones de GEI y las tecnologías 4.0 en el contexto argentino. Se llevará a cabo una exploración exhaustiva de artículos académicos, informes técnicos, políticas públicas y estudios de caso relevantes para identificar las mejores prácticas, tecnologías y estrategias aplicables al ámbito de estudio.

**Modelo Teórico:** A partir de la información y datos teóricos recopilados en la revisión bibliográfica y el análisis documental, se desarrolló un modelo teórico que integra y adapta los elementos clave identificados. Este modelo proporciona un marco conceptual sólido y coherente que guiará el diseño y

[1] GEI y GHG "*Greenhouse Gases*" en inglés. Son gases atmosféricos que retienen el calor y regulan la temperatura terrestre. Su exceso, causado por actividades humanas, intensifica el calentamiento global y desequilibra el clima.

la implementación de estrategias para la reducción de emisiones de CO2 en la logística doméstica en Argentina, considerando factores como la eficiencia energética, la optimización de rutas y la adopción de tecnologías limpias.

**Entrevista con un Especialista:** Se realizó una entrevista con un profesional del ámbito de la logística y las prácticas sustentables, con el fin de validar la información teórica y contrastarla con la experiencia práctica del sector.

### 2.1 Área temática

En el área temática nos centramos en la logística sostenible y en la reducción de emisiones de CO2 en el contexto logístico doméstico de Argentina, que abarca una variedad de subtemas interrelacionados dentro de los cuales se encuentran:

**Logística Sostenible:** Exploración de prácticas, estrategias y tecnologías orientadas a mejorar la sostenibilidad en las operaciones logísticas, tales como la optimización de rutas, la gestión eficiente de recursos y la adopción de tecnologías limpias.

**Reducción de Emisiones de CO2:** Análisis de medidas y soluciones diseñadas para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el transporte y la distribución de mercancías, con un enfoque particular en la reducción de la huella de carbono en el flujo logístico doméstico.

**Contexto Argentino:** Consideración de las particularidades, desafíos y oportunidades específicas del contexto logístico argentino, incluyendo factores económicos, políticos, sociales y ambientales que influyen en la implementación de prácticas sostenibles y la reducción de emisiones de CO2 en el país.

### 2.2 Planteamiento del problema

La principal problemática que esta investigación busca abordar es el aumento de las emisiones de GEI generadas por el transporte por carretera en Argentina. Este sector enfrenta dificultades para implementar estrategias de logística sostenible que contribuyan a reducir dichas emisiones y a gestionar adecuadamente los desechos. Además, existe la necesidad de integrar el uso de energías renovables y adoptar prácticas empresariales más sostenibles para minimizar el impacto ambiental y promover un desarrollo logístico más responsable.

### 2.3 Delimitación de la investigación

Las siguientes limitaciones ayudarán a enfocar la investigación en un área específica y proporcionarán un marco claro para el análisis y la interpretación de los resultados, garantizando la relevancia y la aplicabilidad de los hallazgos en el contexto de las PYMEs industriales en Argentina.

**Ámbito Geográfico**: El estudio se limitará a las PYMEs ubicadas en la zona urbana AMBA (“Área Metropolitana de Buenos Aires”), excluyendo otras regiones o países, con un enfoque particular en las operaciones logísticas domésticas.

**Modo de Transporte:** El análisis estará centrado en los traslados terrestres por carretera mediante el uso de camiones, excluyendo otros modos de transporte como el marítimo y aéreo.

**Recursos y Datos Disponibles:** La investigación utilizará información y datos teóricos existentes proporcionados por empresas y estudios previos, además de los reportes compartidos por la empresa de transportes con la cual se trabajará en conjunto.

## 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1 La Huella de Carbono, un factor clave en la búsqueda de las economías sustentables.

El término “huella de carbono” fue publicado por primera vez en el año 2000 en un artículo del periódico Telegraph (Oxford University Press, 2001), y desde entonces su popularidad fue incrementando año a año tomando cada vez más peso en todo el mundo. Éste se ha convertido en un concepto crucial en el discurso ambiental y económico contemporáneo; este término se refiere a la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI), específicamente dióxido de carbono (CO2) y sus equivalentes, emitidos directa o indirectamente por actividades humanas (Intergovernmental Panel on

Climate Change [IPCC], 2018). La medición de la huella permite evaluar el impacto ambiental de una persona, organización, evento o producto, y se expresa en toneladas de CO2 equivalente (CO2e). Este innovador parámetro se calcula sumando todas las emisiones de GEI generadas por actividades como la producción y el consumo de bienes y servicios, el uso de energía en hogares y empresas, el transporte y la gestión de residuos.

En las últimas décadas, su seguimiento y control ha ganado una relevancia significativa debido a la creciente conciencia sobre el cambio climático y la urgencia de adoptar prácticas sostenibles por parte de las empresas y prácticas sociales; esto se debe a la creciente evidencia científica sobre el vínculo entre las emisiones de GEI y el calentamiento global. Estudios como el Informe de Evaluación del IPCC (2021) han destacado que la actividad humana es responsable de aproximadamente el 95% del aumento de la temperatura global desde mediados del siglo XX, atribuido principalmente a las emisiones de CO2. A medida que el cambio climático se convierte en una preocupación central, gobiernos, empresas y consumidores están tomando medidas para reducir su huella; esto se puede ver plasmado en iniciativas como el Acuerdo de París (2015) donde se establecieron metas ambiciosas para limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2 grados Celsius por encima de los niveles preindustriales, lo que implica una reducción drástica de las emisiones de CO2.

### 3.2 Qué son los Gases de Efecto Invernadero y su relevancia en el cambio climático.

Los gases de efecto invernadero son componentes gaseosos en la atmósfera terrestre que tienen la capacidad de absorber y emitir radiación infrarroja (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014)). Este fenómeno es fundamental para mantener una temperatura adecuada en la superficie terrestre, ya que permite que la energía solar llegue a la Tierra y parte de ella sea retenida por la atmósfera, evitando que escape al espacio exterior; sin embargo, el aumento en la concentración de estos gases debido a actividades humanas está contribuyendo al calentamiento global y al cambio climático (Environmental Protection Agency [EPA], 2020).

Dentro de los gases que componen los GEI se destaca principalmente el dióxido de carbono (CO2), el principal gas de efecto invernadero, producido por una variedad de actividades humanas. Representa aproximadamente el 80% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014)). La quema de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas natural, es la principal fuente de sus emisiones, actividad que ocurre en sectores clave como la generación de energía, el transporte, la industria y la calefacción residencial y comercial.

Según el Informe Especial del IPCC sobre el Calentamiento Global de 1.5°C, publicado en 2018, la combustión de combustibles fósiles en los motores de transporte es una fuente significativa de emisiones de dióxido de carbono, el principal gas de efecto invernadero responsable del cambio climático.

### 3.3 Huella de Carbono y el sector logístico

La relación entre los GEI y la logística es un entramado complejo y esencial en la búsqueda de un equilibrio sostenible. Al adentrarnos en los mecanismos de generación de estos gases, es imposible ignorar la vasta influencia de la logística en su producción (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2017). Este sector, vertebrado por un intrincado sistema de transporte, almacenamiento y distribución, actúa como un motor perpetuo que mantiene en movimiento el engranaje del comercio global (McKinnon, 2018). Sin embargo, con cada kilómetro recorrido por un camión, cada tonelada transportada por un buque y cada vuelo de carga, se desencadena una cadena de emisiones de CO2 y otros GEI que permea nuestra atmósfera, exacerbando la crisis climática (Cristea, Hummels, Puzzello, & Avetisyan, 2013).

En el sector logístico, la huella de carbono es hoy un indicador clave de sostenibilidad, ya que sus actividades, como el transporte y el almacenamiento, son responsables de una parte significativa de las emisiones de CO2. Según un informe de la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency [IEA], 2020), el sector del transporte representó aproximadamente el 24% de las emisiones globales de CO2 en 2019, con el transporte por carretera como el mayor contribuyente.

### 3.4 Utilización de GNC como respuesta con beneficios económicos

El uso del gas natural comprimido (GNC) en el transporte terrestre ha demostrado ser una opción económica y eficiente frente a los combustibles tradicionales como el diésel y la gasolina (Ministerio de Economía de la Nación, 2023). A continuación, se desarrollan los principales argumentos que sustentan la viabilidad económica del GNC en comparación con otros combustibles, haciendo énfasis en la reducción de costos operativos, la seguridad energética, y las proyecciones de mercado que favorecen su adopción en Argentina.

#### 3.4.1 Costos Operativos Reducidos y Estabilidad de Precios

Uno de los principales beneficios económicos del GNC es su capacidad para reducir significativamente los costos operativos de los vehículos en comparación con el diésel. Históricamente, el precio del GNC ha sido considerablemente más bajo que el del diésel y la gasolina en Argentina. Por ejemplo, en 2023, el precio promedio del GNC en estaciones de servicio del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) rondaba los ARS 120 por metro cúbico, mientras que el precio del diésel era de aproximadamente ARS 370 por litro (Secretaría de Energía de la Nación, 2023).

Dado que un metro cúbico de GNC equivale en términos energéticos a 1,1 litros de diésel, el ahorro para los transportistas es evidente. Con estos precios, el costo de operar un vehículo a GNC puede ser hasta un 60% menor en comparación con un vehículo similar que utilice diésel.

A lo largo del tiempo, esta diferencia de precios ha sido consistente, lo que refuerza la viabilidad del GNC como una opción económica a largo plazo. A diferencia del diésel, cuyo precio puede verse afectado por factores geopolíticos y fluctuaciones en la oferta global, el GNC ha mantenido un precio más constante debido a la producción doméstica. Esto no solo proporciona una mayor previsibilidad en los costos operativos para los transportistas, sino que también contribuye a la seguridad energética nacional al disminuir la exposición a shocks externos (YPF, 2023).

#### 3.4.2 Seguridad Energética

La seguridad energética es un factor crucial en la decisión de utilizar GNC como combustible para el transporte terrestre. Argentina cuenta con vastas reservas de gas natural, especialmente en el yacimiento de Vaca Muerta, lo que asegura un suministro abundante y relativamente estable de GNC en el futuro previsible. Esta abundancia de recursos locales reduce la dependencia del país de las importaciones de petróleo y diésel, lo que a su vez mitiga los riesgos asociados a la volatilidad de los precios internacionales del crudo (Secretaría de Energía de la Nación, 2023).

#### 3.4.3 Beneficios Fiscales y Políticas de Incentivos

El gobierno argentino ha implementado diversas políticas de incentivo para fomentar el uso del GNC en el transporte terrestre, lo que refuerza aún más su viabilidad económica. Entre estos incentivos se encuentran reducciones en impuestos específicos, subsidios para la conversión de vehículos de gasolina o diésel a GNC, y programas de financiamiento que facilitan la adopción de esta tecnología (Ente Nacional Regulador del Gas [ENARGAS], 2023).

Estos beneficios fiscales y subsidios son especialmente importantes en un contexto donde las empresas de transporte buscan maximizar la eficiencia y reducir costos en un mercado competitivo. La disponibilidad de incentivos hace que la transición al GNC sea más atractiva desde el punto de vista económico, asegurando un retorno de la inversión más rápido (Ente Nacional Regulador del Gas [ENARGAS], 2023).

### 3.5 Suministro de gas natural en Argentina

El gas natural es uno de los pilares fundamentales en la matriz energética de Argentina, siendo vital tanto para el consumo interno como para la exportación. El país cuenta con varias cuencas sedimentarias que albergan importantes reservas, las cuales han sido explotadas de manera intensiva en las últimas décadas. Estas cuencas no solo varían en términos de geología y ubicación, sino también en su capacidad de producción, calidad del gas y las zonas que abastecen (Ente Nacional Regulador del Gas [ENARGAS], 2023).

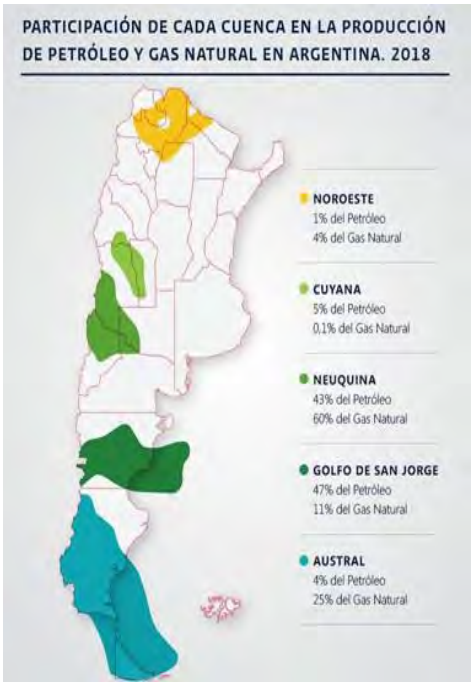



*Figura 3 Distribución de las distintas cuencas con extracción de gas natural en el territorio argentino. Fuente: Secretaría de Energía, 2018.*

### 3.6 Matriz Energética Actual y Dependencia del Gas Natural

En 2023, la matriz energética de Argentina sigue mostrando una marcada dependencia del gas natural, que representa alrededor del 53% de la oferta de energía primaria del país (Secretaría de Energía de la Nación, 2023). Esta preponderancia se debe en gran medida a la abundancia de reservas de gas natural en el país, particularmente en la Cuenca Neuquina, que alberga el yacimiento de Vaca Muerta. Además, el gas natural es una fuente de energía relativamente económica y de menor emisión de carbono en comparación con otros combustibles fósiles como el carbón o el petróleo (Ente Nacional Regulador del Gas [ENARGAS], 2023).

En el sector de generación eléctrica, más del 60% de la electricidad es producida por centrales térmicas que utilizan gas natural como combustible principal. Esta dependencia tiene implicaciones significativas, tanto positivas como negativas; por un lado, asegura un suministro energético estable y relativamente barato, por otro, crea vulnerabilidades en caso de fluctuaciones en los precios internacionales del gas o problemas en la infraestructura de transporte y distribución (Instituto Argentino de Energía General Mosconi, 2022).

### 3.7 Vaca Muerta: Una Reserva de Gas No Convencional de Importancia Mundial

Vaca Muerta es, sin duda, uno de los yacimientos de gas no convencional más importantes del mundo y la piedra angular de la política energética de Argentina. Ubicada en la Cuenca Neuquina, se estima que Vaca Muerta contiene reservas recuperables de gas que ascienden a 308 billones de pies cúbicos, lo que la posiciona como una de las principales fuentes de shale gas a nivel global (Secretaría de Energía de la Nación, 2023).

El desarrollo de Vaca Muerta ha sido identificado como clave para la autosuficiencia energética de Argentina y para posicionar al país como un exportador neto de gas natural. Actualmente, los

proyectos en Vaca Muerta están en distintas etapas de desarrollo, con varias empresas internacionales y nacionales invirtiendo en la exploración y producción de gas y petróleo no convencional. Empresas como YPF, ExxonMobil, Shell, y Total han iniciado operaciones en la región, desarrollando infraestructura para la extracción y transporte del gas (YPF, 2023).

### 3.8 Proyecciones de Mercado Favorables

El desarrollo continuo de Vaca Muerta y la expansión de la infraestructura de GNC en Argentina han llevado a proyecciones de mercado favorables para el uso de este combustible en el transporte terrestre. Con la creciente producción de gas natural en el país, se espera que el suministro de GNC sea suficiente para satisfacer tanto la demanda interna como para permitir un aumento en las exportaciones de gas natural licuado (GNL) (YPF, 2023).

Además, la infraestructura para la distribución de GNC en Argentina es una de las más desarrolladas de América Latina, con una extensa red de estaciones de servicio que cubren gran parte del territorio nacional. Esta infraestructura robusta asegura que los vehículos a GNC puedan operar sin limitaciones significativas, lo que es crucial para el sector del transporte, donde la autonomía y el acceso a combustibles son factores determinantes (Ministerio de Economía de la Nación, 2023).

A futuro, se espera que el crecimiento de la demanda de GNC continúe, impulsado por la necesidad de reducir los costos operativos y las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector del transporte. Con las proyecciones actuales, el GNC está bien posicionado para desempeñar un papel central en la transición energética de Argentina, ofreciendo una solución económica y sostenible para el transporte terrestre (Instituto Argentino de Energía General Mosconi, 2022).

## 4. Hipótesis de Investigación

La integración de prácticas sostenibles, el manejo responsable de los residuos y la utilización de Gas Natural Comprimido como combustible en los transportes terrestres por carretera contribuyen significativamente a la reducción de las emisiones de CO2 en los flujos logísticos.

## 5. Resultados y aplicación práctica

Con el objetivo de pasar a la práctica y corroborar la veracidad de la teoría anteriormente desarrollada, se realizó un seguimiento de actividades en conjunto a una empresa de logística, la cual, entre tantos desafíos operativos, se encontraba atravesando un proceso de transformación tecnológica y cultural. La investigación se orientó a evaluar la factibilidad técnica y económica del uso de Gas Natural Comprimido en reemplazo parcial del gasoil, junto con la implementación de prácticas sostenibles complementarias relacionadas con la gestión de residuos y la optimización logística.

La empresa seleccionada desarrolla tareas de transporte de cargas generales y contenedores en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), operando con una flota compuesta por unidades diésel convencionales y camiones recientemente convertidos a GNC. La aplicación práctica permitió comparar ambos sistemas de propulsión bajo condiciones reales de operación, analizando el consumo energético, las emisiones estimadas de $CO_2$ y los costos de mantenimiento.

En términos técnicos, la conversión parcial de unidades diésel al uso de Gas Natural Comprimido permitió alcanzar una reducción promedio del 22% en las emisiones de dióxido de carbono equivalente, tomando como referencia el consumo específico por kilómetro recorrido.

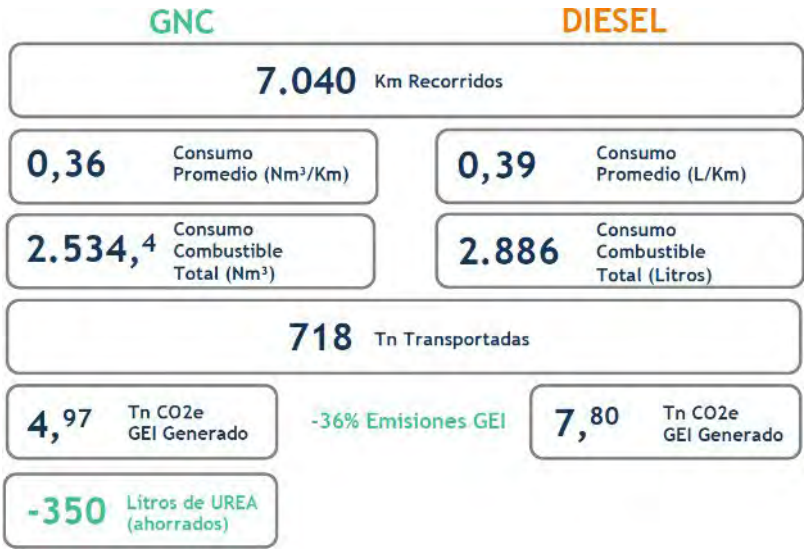



*Figura 2 Resultados tras 60 días de utilización de unidad impulsada a GNC vs unidad promedio Diesel. Fuente: Ilustración propia*

Esta disminución se explica por la mayor eficiencia termodinámica del gas natural, su menor contenido de carbono por unidad energética y un factor de emisión sensiblemente inferior al del gasoil (aproximadamente 2,75 kg $CO_2$/Nm³ frente a 3,16 kg $CO_2$/l).

Adicionalmente, se registró una reducción del costo operativo por kilómetro de entre 25% y 30%, variación asociada al precio relativo del combustible, al menor desgaste del motor y a la disminución del mantenimiento correctivo. Estos resultados demuestran que la sustitución parcial de gasoil por GNC no solo reduce la huella de carbono, sino que mejora el rendimiento energético de la flota, aportando ventajas ambientales y económicas.

Desde una perspectiva económica, el análisis de flujos descontados reveló que la inversión inicial en reconversión —que incluye la instalación de tanques de almacenamiento, sistemas de inyección y adecuación de componentes— se amortiza en un plazo promedio de 3,6 años. Este desempeño genera un Retorno de Inversión (ROI) positivo dentro del ciclo de vida útil del vehículo, confirmando la viabilidad financiera del GNC para el transporte mediano y pesado.

La relación costo-beneficio obtenida respalda la adopción progresiva de esta tecnología en el contexto argentino, donde la disponibilidad de gas natural y la infraestructura existente constituyen ventajas competitivas estructurales frente a otros combustibles alternativos.

La aplicación práctica también permitió identificar limitaciones estructurales que condicionan la adopción masiva del GNC: principalmente la escasez de estaciones de carga adecuadas para camiones, los tiempos adicionales de repostaje y la ausencia de políticas fiscales que estimulen la conversión tecnológica. Pese a ello, los resultados confirman que el GNC constituye una solución inmediata y de transición dentro de la matriz energética argentina, especialmente considerando la alta disponibilidad de gas natural en cuencas locales como la Neuquina y Vaca Muerta.

### 5.1 Gestión ambiental complementaria

De manera complementaria al cambio de combustible, la empresa implementó acciones de gestión ambiental enfocadas en la reducción de residuos operativos, destacándose el recapado de neumáticos y la recolección responsable de aceites usados.

El recapado permitió extender la vida útil de las cubiertas en un 30% promedio, disminuyendo costos de reposición y volumen de residuos generados.

Estas acciones ambientales, si bien con menor impacto cuantitativo que la sustitución de combustible, contribuyeron a reforzar el compromiso institucional con la sostenibilidad, demostrando que la gestión integral puede implementarse de forma económicamente viable.

### 5.2 Desafíos futuros

Entre las principales limitaciones identificadas se destacan la falta de estaciones de carga adecuadas para camiones de gran porte, los tiempos adicionales de repostaje y la escasez de incentivos fiscales específicos que impulsen la conversión tecnológica a gran escala. Estas condiciones, sumadas a la falta de una política energética integral y sostenida, limitan la expansión del GNC en el segmento del transporte pesado, a pesar de su viabilidad técnica y económica comprobada. No obstante, dichas barreras no comprometen el potencial de la tecnología, sino que condicionan su velocidad de adopción y escalabilidad dentro del mercado argentino.

A estos factores estructurales se suma un cambio de paradigma necesario dentro de las empresas del sector logístico, donde la incorporación de energías limpias exige transformaciones culturales y de gestión. La transición hacia un modelo de transporte más sustentable requiere superar la resistencia al cambio organizacional, promover la capacitación técnica del personal y reorientar la toma de decisiones hacia criterios de eficiencia y sostenibilidad. Este proceso implica repensar las estrategias empresariales tradicionales —basadas en el corto plazo y la reducción de costos inmediatos— para adoptar una visión de largo plazo centrada en la rentabilidad ambiental, económica y social.

### 5.3 Resultados generales

Del análisis conjunto se desprende que la aplicación de estrategias sostenibles en transporte —centradas en el uso de GNC y en la gestión responsable de insumos— generó una reducción total del 18% en la huella de carbono corporativa.

Durante la operación no se registraron diferencias significativas en la capacidad de carga ni en la potencia útil de los motores convertidos, manteniendo rendimientos operativos comparables a los camiones diésel originales. La autonomía media se situó en torno a los 380–420 km por carga completa, suficiente para recorridos regionales dentro del AMBA.

A nivel económico, se evidenció un ahorro anual cercano al 15% en costos operativos, resultado de la menor dependencia del gasoil y la optimización en mantenimiento.

La experiencia analizada demuestra que la incorporación del GNC en flotas de transporte pesado representa una oportunidad concreta para avanzar hacia una logística de bajas emisiones en Argentina. Su implementación progresiva, combinada con medidas complementarias como el recapado de neumáticos y la gestión responsable de aceites usados, permite conformar un modelo operativo más eficiente, competitivo y ambientalmente equilibrado.

Los resultados obtenidos se encuentran en línea con los reportes de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2021), que indican reducciones promedio del 20–25% de emisiones de $CO_2$ al sustituir gasoil por GNC en transporte pesado. Este nivel de desempeño refuerza la aplicabilidad de la tecnología en contextos latinoamericanos con disponibilidad de gas natural.

En suma, la experiencia práctica permitió validar las hipótesis teóricas planteadas en el trabajo, confirmando que la adopción de combustibles alternativos y buenas prácticas ambientales son técnica y económicamente factibles en el contexto logístico argentino.

## 6. Entrevista a Especialista

Como parte de la investigación se realizó una entrevista a Lucas Woinilowicz, Gerente de Desarrollo de Negocios en Scania y especialista en tecnologías aplicadas al transporte de carga. El experto destacó que, si bien existen múltiples alternativas energéticas —como biodiésel, biometano, electricidad e hidrógeno—, en el contexto argentino el gas natural (GNC/GNL) constituye hoy la opción más viable y de adopción creciente.

Según el especialista, el uso de camiones a gas ya fue incorporado por parte del mercado local debido a sus beneficios en términos de reducción de costos operativos y, principalmente, por su aporte a la disminución de emisiones de $CO_2$, material particulado y óxidos de nitrógeno, además de una reducción significativa del ruido. Asimismo, planteó que el gas puede funcionar como “puerta de entrada” al biometano, combustible considerado carbono-neutral, lo que refuerza su valor como etapa intermedia hacia una logística más sostenible.

Por otro lado, advirtió que la electrificación aún se encuentra distante en la región —con un horizonte estimado de más de diez años— debido a la falta de infraestructura y a los elevados costos de

inversión. En este sentido, subrayó que la transición hacia un transporte de bajas emisiones en Argentina debe ser progresiva, comenzando por soluciones ya disponibles como el GNC.

## 7. Conclusión

La investigación sobre la sostenibilidad en el transporte terrestre, centrada en la reducción de emisiones de CO2 mediante el uso de camiones, pone de manifiesto la importancia de orientar la logística hacia un modelo más eficiente y respetuoso del medio ambiente. Este estudio subraya que el transporte de mercancías por carretera, uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero, puede beneficiarse significativamente de la adopción de combustibles alternativos y la optimización de procesos logísticos, sin comprometer la rentabilidad.

A través de un análisis detallado de las mejores prácticas y tecnologías emergentes, se identifica que la integración de soluciones sostenibles en las PYMEs es no sólo viable, sino necesaria para enfrentar los desafíos del cambio climático. Sin embargo, la implementación de estas prácticas enfrenta barreras, como la limitada disponibilidad de recursos financieros y tecnológicos, especialmente en contextos como el argentino. Por ello, se destaca la necesidad de un marco de políticas públicas que incentive la transición hacia tecnologías limpias y promueva el desarrollo de infraestructura adecuada.

El uso de energías renovables, la optimización de rutas y la electrificación de flotas, entre otras medidas, no solo contribuyen a la reducción de emisiones, sino que también mejoran la eficiencia operativa. Esto es clave para que las PYMEs no solo se adapten a las exigencias ambientales globales, sino que también aseguren su competitividad en el largo plazo. Adicionalmente, la colaboración entre actores del sector y la implementación de normativas que apoyen las prácticas sostenibles emergen como pilares fundamentales en este proceso.

En definitiva, el camino hacia una logística más verde y sostenible es inevitable y presenta múltiples beneficios, no solo en términos de mitigación del impacto ambiental, sino también en la mejora de la eficiencia y la resiliencia de las operaciones logísticas. Para lograrlo, es fundamental un enfoque integral que combine la innovación tecnológica con el apoyo regulatorio, permitiendo a las empresas reducir su huella de carbono sin comprometer su viabilidad económica.

## 8. Equipo de investigación

[1] Ingeniero Eléctrico, UTN. Profesor, Investigador Facultad de Ingeniería, Universidad del Salvador, Argentina. Celular: 005491167972095. Email: cesar.bonantini@usal.edu.ar

[2] Ingeniero Industrial, USAL, Egresado de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Salvador, Argentina. Celular: 0054-93489686674. Email: augusto.giordano@usal.edu.ar

**REFERENCIAS**


1. Cristea, A., Hummels, D., Puzzello, L., & Avetisyan, M. (2013). Trade and the greenhouse gas emissions from international freight transport. *Journal of Environmental Economics and Management, 65*(1), 153–173. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2012.07.006
2. Environmental Protection Agency. (2020). *Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks*. EPA. https://www.epa.gov/ghgemissions
3. Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS). (2023). *Informe anual de gas natural*. ENARGAS. https://www.enargas.gob.ar
4. Instituto Argentino de Energía General Mosconi. (2022). *Informe energético anual*. IAE Mosconi. https://www.iae.org.ar
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report. https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr
6. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global warming of 1.5 ºC. An IPCC Special Report*. https://www.ipcc.ch/sr15
7. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution to the Sixth Assessment Report. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1
8. International Energy Agency (IEA). (2020). *CO2 emissions from fuel combustion*. IEA. https://www.iea.org
9. McKinnon, A. (2018). *Decarbonizing logistics: Distributing goods in a low carbon world*. Kogan Page.
10. Ministerio de Economía de la Nación. (2023). *Informe sobre precios de combustibles en Argentina*. Ministerio de Economía.
11. Oxford University Press. (2001). *Carbon footprint*. Oxford English Dictionary.
12. Rodrigue, J. P., Comtois, C., & Slack, B. (2017). *The geography of transport systems* (4th ed.). Routledge.
13. Secretaría de Energía de la Nación. (2023). *Reportes energéticos anuales*. Secretaría de Energía.
14. United Nations. (2015). *Paris Agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int
15. YPF. (2023). *Reportes corporativos sobre energía y combustibles*. YPF.

# ASIGNACIÓN SOSTENIBLE DE SITIOS DE ATRAQUE EN PUERTOS CON MÚLTIPLES CANALES DE ACCESO

Rainoldi, Marco J.; Moreno, M. Susana

*Planta Piloto de Ingeniería Química – PLAPIQUI (Universidad Nacional del Sur-CONICET)*
*Bahía Blanca, Argentina.*
*mrainoldi@plapiqui.edu.ar; smoreno@plapiqui.edu.ar*

**RESUMEN**

En este trabajo se presenta un modelo multiobjetivo mixto entero lineal (MOMILP) que, en un contexto multiperiodo, integra la asignación de muelles con ventanas de tiempo asociadas a las mareas y la programación del tránsito de buques en canales restringidos, incorporando las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por estas operaciones. A diferencia de estudios previos, se consideran múltiples canales de acceso al puerto. Cada canal está compuesto por un número variable de segmentos con restricciones de navegación específicas, ya sea por profundidad o por ancho. El modelo también permite que los barcos utilicen energía eléctrica provista desde tierra durante su estadía en los muelles, reduciendo así las emisiones. Se plantean tres objetivos contrapuestos: minimizar el costo total, el tiempo total de permanencia de las embarcaciones y las emisiones generadas tanto en navegación como en las fases de espera. Para resolver el problema se implementa el método □-*constraint* aumentado que garantiza obtener soluciones no dominadas en el frente de Pareto. Se presenta un caso de estudio para demostrar la eficiencia de la formulación y analizar los compromisos entre los criterios de optimización. Los resultados muestran que al priorizar costos se emplea el canal más corto y se evita el uso de energía eléctrica, aunque con esperas prolongadas. En cambio, al minimizar emisiones se favorece el uso de la energía del puerto, con mayores costos y demoras. Finalmente, al reducir tiempos de permanencia en el puerto se incrementan las emisiones debido a que se recurre al canal más largo con mayor frecuencia.

**Palabras Claves:** Modelo MOMILP, Asignación de Muelles, Programación del Tránsito en Canales, Gases de Efecto Invernadero.

**ABSTRACT**

This work presents a multi-objective mixed-integer linear programming (MOMILP) model that, in a multiperiod context, integrates the berth allocation problem with tide-dependent time windows and the scheduling of vessel traffic in restricted channels, while accounting for the greenhouse gas emissions generated by these operations. Unlike previous studies, this work considers multiple access channels to the port. Each channel is composed of a variable number of segments with specific navigational restrictions, either due to depth or width limitations. The model also allows vessels to use shore-side electricity during their stay at the berths, thereby reducing emissions. Three conflicting objectives are addressed: minimizing the total cost, the total turnaround time of vessels, and the emissions generated during navigation and waiting periods. To solve the problem, the augmented ε-constraint method is implemented, ensuring the generation of non-dominated solutions on the Pareto front. A case study is presented to demonstrate the efficiency of the formulation and to analyze the trade-offs among the optimization criteria. The results show that when costs are prioritized, vessels tend to use the shortest channel and avoid shore power, which in turn leads to longer waiting times. Conversely, minimizing emissions promotes the use of shore-side electricity but results in higher costs and delays. Finally, reducing vessel turnaround times increases emissions, since the longer channel is used more frequently.

**Keywords:** MOMILP Model, Berth Allocation Problem, Waterway Ship Scheduling Problem, Greenhouse Gas Emissions.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los puertos son sistemas complejos que enfrentan importantes desafíos logísticos y de gestión, cuya eficiencia depende, en gran medida, de la asignación óptima de recursos. Entre los principales problemas en su operatoria, se encuentra la asignación de embarcaciones a sitios de atraque, conocida como *Berth Allocation Problem* (BAP). Este problema consiste en asignar de manera eficiente un conjunto de barcos a los muelles disponibles en el puerto dentro de un horizonte de programación acotado. Por su relevancia, numerosos autores han abordado este problema mediante modelos matemáticos que buscan optimizar diversos criterios. El objetivo más frecuente consiste en minimizar el tiempo total de servicio de todos los barcos en el puerto, definido como el periodo transcurrido desde su llegada al puerto hasta la finalización del servicio en el muelle (Cordeau et al., 2005). Sin embargo, se ha considerado la reducción de otros objetivos, tales como el tiempo total de permanencia en el puerto, los costos operativos y el número de barcos rechazados, entre otros (Buhrkal et al., 2011). Recientemente, la disminución de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociadas a actividad de los buques, ha cobrado gran relevancia como criterio adicional de optimización (Wang et al., 2023).

En la bibliografía se han propuesto diversas variantes del BAP que consideran múltiples restricciones temporales y espaciales. Según el horario de arribo de las embarcaciones, los modelos se clasifican en estáticos o dinámicos. En el enfoque estático, todos los buques están presentes en el puerto al inicio del horizonte de programación. En el dinámico, en cambio, pueden arribar en cualquier momento a lo largo del horizonte de planificación. Por otra parte, en función de la disposición de los sitios de atraque, el BAP se distingue en discreto, continuo o híbrido. En el caso discreto, cada muelle atiende solo una embarcación a la vez, independientemente de su tamaño. En el continuo, varios buques pueden compartir el mismo muelle siempre que la suma de sus esloras no supere el largo total disponible. Finalmente, en el híbrido un muelle puede operar bajo condiciones discretas o continuas, según las características y necesidades de los barcos entrantes (Buhrkal et al., 2011).

Por otro lado, en muchos puertos el acceso al mar abierto se realiza a través de canales o vías de ingreso con restricciones de cruce y profundidad asociadas a la marea. Por ello, es esencial planificar el tráfico de barcos para reducir demoras y mejorar la eficiencia del sistema. Este problema, conocido como *Waterway Ship Scheduling Problem* (WSSP), ha sido abordado por varios autores. Lalla-Ruiz et al. (2018) propusieron un modelo mixto entero lineal (MILP) para programar el tránsito de buques en vías navegables congestionadas, minimizando los tiempos de espera y, en consecuencia, las emisiones innecesarias. Li et al. (2021) desarrollaron un modelo de optimización multiobjetivo para la programación del tráfico en un canal restringido, incorporando restricciones operativas y resolviéndolo mediante un enfoque heurístico.

En general, los problemas BAP y WSSP se han estudiado de manera independiente. Sin embargo, algunos trabajos han explorado su integración. Zhen et al. (2017) desarrollaron un modelo de programación entera (IP) que considera de manera conjunta la asignación de muelles y de grúas. El modelo considera ventanas de tiempo determinadas por las mareas para el ingreso y salida de barcos en un puerto al que se accede a través de un canal con un único segmento restringido. Por su parte, Corry et al. (2019) propusieron una formulación MILP que integra la programación de los movimientos en el canal con la asignación y secuenciación de muelles, incorporando restricciones de cruce y variaciones en las condiciones del canal. Cheimanoff et al. (2022) proponen un modelo MILP para abordar el BAP en terminales con múltiples muelles continuos y arribos dinámicos, incorporando además restricciones relacionadas con los ciclos de marea.

Asimismo, se han realizado esfuerzos por incorporar la dimensión ambiental en los modelos de optimización de la logística portuaria. Wang et al. (2018) estudiaron el problema integrado de asignación de muelles y grúas, considerando dos políticas impositivas sobre las emisiones de carbono en los puertos. Propusieron dos formulaciones utilizando programación mixta entera (MIP), en las cuales la función objetivo de costos incluye un impuesto con tasa unitaria en la primera y una tasa escalonada en la segunda. Ma et al. (2021) proponen un modelo de optimización multiobjetivo para el ruteo de los barcos que reduce simultáneamente los costos totales y las emisiones de $CO_2$ y SOx mediante la selección de rutas y velocidades apropiadas. Jiang et al. (2022) propusieron un modelo multiobjetivo que combina el BAP con la programación de buques en el canal de ingreso, considerando un número fijo de segmentos, restricciones de mareas, conflictos de tránsito y emisiones de carbono.

Según Wang et al. 2023, una de las medidas para reducir las emisiones de los barcos en el puerto, consiste en la utilización de diferentes combustibles. En este contexto, Skoko et al. (2024) compararon embarcaciones con propulsión diésel frente a una alternativa híbrida, evaluando consumo de

combustible, generación de energía y emisiones. Por otro lado, Çağlayan et al. (2024) propusieron un modelo multicriterio con el objetivo de reducir tanto el tiempo de fondeo innecesario como las emisiones de dióxido de carbono atribuibles al tiempo de espera, al motor auxiliar y a las calderas. Otro método para reducir emisiones de los buques es la utilización de energía desde tierra (*shore power*) (Qi et al., 2020). Zhang et al. (2025) desarrollaron un modelo multiobjetivo que combina el BAP con la asignación coordinada de energía desde tierra, optimizando simultáneamente criterios económicos, ambientales y operativos. Los autores utilizan un algoritmo evolutivo multiobjetivo para hallar las soluciones de Pareto.

Como se observa, se han realizado intentos para combinar el BAP y WSSP, sin embargo, en la mayoría de los casos se considera un único canal compuesto por una sola sección restringida, ya sea por profundidad o ancho. En la realidad portuaria, la situación es mucho más compleja por la presencia de varias vías de acceso con distintas secciones y múltiples restricciones en cada una. En consecuencia, se destaca la falta de formulaciones que incluyan mayor número de canales y una mayor complejidad en los mismos, factores que influyen fuertemente en la programación del ingreso y egreso de los buques.

Por lo tanto, este trabajo propone un modelo multiobjetivo MILP (MOMILP) multiperiodo que integra la asignación discreta de sitios de atraque con ventanas de tiempo asociadas a las mareas con la programación del tránsito de buques, considerando la existencia de varios canales de acceso restringidos. A su vez, cada canal está compuesto por un numero variable de secciones, cada una con restricciones de circulación y de calado. La formulación minimiza tres funciones objetivo contrapuestas: el tiempo total de permanencia de los buques en el puerto, las emisiones de GEI que generan y sus costos operativos. Además, se incorpora la posibilidad que los barcos utilicen energía eléctrica del muelle en lugar de la del motor auxiliar opción que, aunque genera un costo adicional, permite disminuir las emisiones locales. El modelo determina el momento en el que cada buque ingresa y egresa de los distintos segmentos de los canales seleccionados —tanto para entrar como para salir del puerto— el muelle asignado, los periodos inicio y finalización de su estadía, y los tiempos de espera anteriores y posteriores a su procesamiento. La formulación se resuelve mediante el método AUGMECON2, que permite obtener soluciones eficientes (no dominadas) del frente de Pareto y evita la generación de soluciones débilmente eficientes.

## 2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Basados en un BAP discreto y dinámico y en el esquema de la Figura 1, este trabajo considera la asignación diferentes buques $v = 1,2, \dots, |V|$ a un conjunto de muelles $B$ en un puerto que cuenta con varios canales de acceso $c = 1,2, \dots, |C|$ , cada uno de cuales está dividido en secciones $S_c$. Algunos de estos segmentos presentan limitaciones de ancho $(s \in SC_c)$, donde se prohíbe el cruce de barcos, mientras que otros tienen restricciones de calado $(s \in SH_c)$ que impiden la circulación de buques de gran calado $(v \in VH)$ durante la marea baja. Dentro del horizonte de planeamiento $H$, dividido en $t = 1,2, \dots, |T|$ periodos de tiempo, se debe programar la entrada los buques al puerto para realizar las operaciones de carga o descarga. El subconjunto $TM$ identifica los periodos $t$ correspondientes a los ciclos de mareas altas durante los cuales buques de gran calado pueden circular por las secciones restringidas $SH_c$.

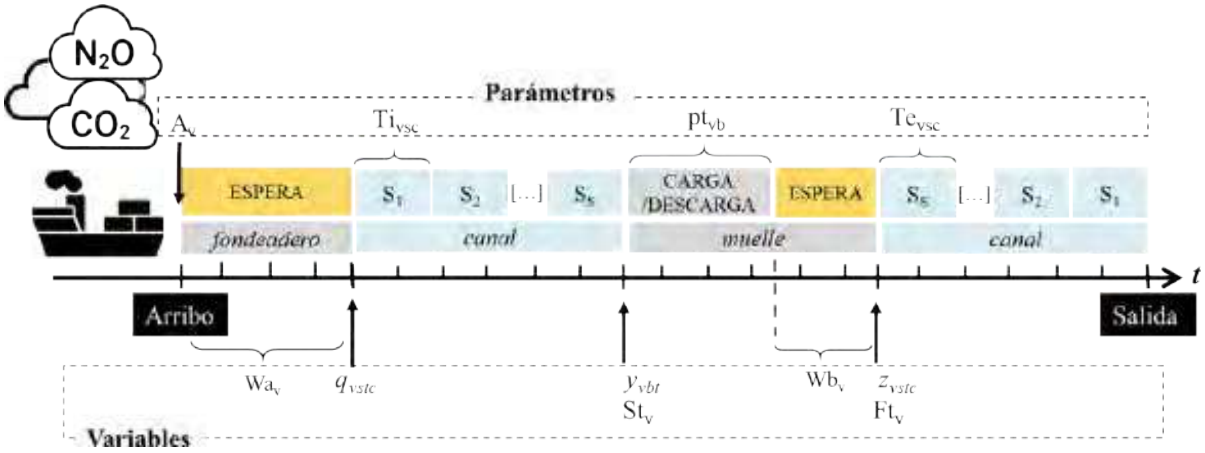



*Figura 1 Esquema de las operaciones de los buques en el puerto.*

Cada buque $v$ tiene un tiempo de arribo al fondeadero $A_v$, desde donde podrá ingresar directamente al puerto o deberá esperar un tiempo $Wa_v$ en función de la disponibilidad de muelles y de las restricciones de circulación en los canales de acceso. Una vez terminada sus operaciones en el muelle, el buque $v$ podrá abandonar el puerto inmediatamente o esperar un tiempo adicional $Wb_v$ en el muelle asignado hasta que se habilite su tránsito por alguno de los canales. El buque $v$ podrá ocupar el muelle $b$ solo si su calado $D_v$ y eslora $L_v$ no superan la profundidad máxima $D_b^{max}$ y el largo máximo $L_b^{max}$ del muelle. Se asumen conocidos los tiempos de operación (atraque y carga/descarga) del buque $v$ en el muelle $b$, $pt_{vb}$, así como los tiempos de tránsito en cada sección $s$ del canal $c$, tanto para el ingreso $Ti_{vsc}$ como para la salida $Te_{vsc}$, los cuales pueden diferir debido a factores operativos como la velocidad del barco. Además, cada sección tiene un número máximo de buques que pueden circular simultáneamente, $NV$.

Para evaluar el impacto ambiental, se considera que los motores de los buques emiten $k = 1,2, \dots, |K|$ GEI en función del combustible utilizado. Se asume que los barcos emplean motores diésel de baja velocidad (*Slow-Speed Diesel*, SSD), típicos de embarcaciones de gran porte como los graneleros, que emplean fueloil pesado (*Heavy Fuel Oil*, HFO) en el motor principal y diésel marino (*Marine Gas Oil*, MGO) en el motor auxiliar.

Los factores de emisión de cada gas $k$ [g/kWh] se determinan según valores estandarizados por la *Environmental Protection Agency* - EPA (2022) y se expresan en equivalentes de $CO_2$ [g $CO_{2eq}$], conforme al Potencial de Calentamiento Global (IPCC, 2021). Las emisiones se calculan a partir de la energía generada por los motores [kWh], basándose en valores promedio de potencia y los factores de emisión. Así, $FES_k$ representa el factor de emisión del gas $k$ asociado uso del motor auxiliar, que opera de manera continua para proveer energía eléctrica a bordo mientras que $FEM_k$ corresponde al motor principal, que funciona durante la navegación por los canales. La potencia del buque depende del motor en uso: $PA_v$ cuando opera el motor auxiliar, mientras que si usa del motor principal se distingue la potencia $PD_v$ cuando navega en lastre (sin carga) y $PC_v$ cuando lo hace con carga. Para distinguir ambos estados se definen los subconjuntos $VC$ para los buques que ingresan con carga y $VD$ para buques que ingresan sin carga, respectivamente.

Los costos operativos de los buques en el puerto refieren al consumo de combustible por los motores y al costo de la energía provista desde tierra cuando se emplea. Así, para cada barco se conocen los costos $CA_v$ y $CP_v$ asociados al combustible del motor auxiliar y del motor principal, respectivamente. Se incluyen además los consumos específicos de combustible (*Brake Specific Fuel Consuption,* BSFC) $FCA_v$ para el motor auxiliar y $FCP_v$ para el motor principal, que miden la masa de combustible consumida por kW de potencia generada en una hora. Se asume además un costo por hora $CE_v$ cuando el buque utiliza energía del muelle para sustituir al motor auxiliar.

En resumen, el problema consiste en determinar, dentro de un horizonte de planificación dado, el muelle asignado a cada buque, el canal por el que ingresa y egresa del puerto, los periodos en los que entra y sale de cada sección de estos canales, así como los horarios en los que comienza y finaliza su procesamiento en el muelle. Además, se calculan los costos y las emisiones asociadas a estas actividades, considerando la opción de utilizar energía del muelle para disminuirlas.

## 3. FORMULACION MATEMÁTICA

A continuación, se presenta el modelo MOMILP propuesto:

$$CVT = \sum_{v \in V} (CVF_v + CVC_v + CVD_v + CVB_v + CEB_v) \quad (1)$$

$$EMT = \sum_{v \in V} \sum_{k \in K} (EMF_{vk} + EMC_{vk} + EMD_{vk} + EMB_{vk}) \quad (2)$$

$$TPT = \sum_{v \in V} (Ft_v - A_v + \sum_{c \in C} \sum_{s \in S_c} Te_{vsc} \cdot o_{vc}) \quad (3)$$

Sujeto a:

$$\sum_{b \in B} \sum_{t \in T} y_{vbt} = 1 \qquad \forall v \in V \quad (4)$$

$$\sum_{v\in V} x_{vbt} = 1 \qquad \forall\, b \in B, t \in T \tag{5}$$

$$St_v = \sum_{b\in B}\sum_{t\in T} t \cdot y_{vbt} \qquad \forall\, v \in V \tag{6}$$

$$\sum_{b\in B}\sum_{t\in T} x_{vbt} = \sum_{b\in B} (pt_{vb} \cdot \sum_{t\in T} y_{vbt}) \qquad \forall\, v \in V \tag{7}$$

$$\sum_{t' \le t+pt_v-1} x_{vbt'} \ge pt_{vb} \cdot y_{vbt} \qquad \forall\, v \in V, b \in B, t \in T \tag{8}$$

$$Ft_v \ge St_v + \sum_{b\in B}\sum_{t\in T} x_{vbt} \qquad \forall\, v \in V \tag{9}$$

$$D_v \cdot \sum_{t\in T} y_{vbt} \le D_b^{max} \qquad \forall\, v \in V, b \in B \tag{10}$$

$$L_v \cdot \sum_{t\in T} y_{vbt} \le L_b^{max} \qquad \forall\, v \in V, b \in B \tag{11}$$

$$St_v \ge Ft_{v'} - M \cdot (2 - y_{v'bt} - \sum_{t' \ge t} y_{vb,t'+1}) \qquad \forall\, (v \wedge v') \in V, v' \ne v, b \in B, t \in T \tag{12}$$

$$\sum_{c\in C} r_{vc} = 1 \qquad \forall\, v \in V \tag{13}$$

$$\sum_{c\in C} o_{vc} = 1 \qquad \forall\, v \in V \tag{14}$$

$$\sum_{t\in T} q_{vsct} = r_{vc} \qquad \forall\, v \in V, s \in S_c, c \in C \tag{15}$$

$$\sum_{t=1}^{|T|-Ts_{sv}} z_{vsct} = o_{vc} \qquad \forall\, v \in V, s \in S_c, c \in C \tag{16}$$

$$St_v \ge \Big(\sum_{t\in T} t \cdot q_{vsct} + \sum_{s' \ge s}^{s' \le |S_c|} Ti_{vs'c}\Big) - M \cdot (1 - r_{vc}) \qquad \forall\, v \in V, s \in S_c, c \in C \tag{17}$$

$$St_v \le \Big(\sum_{t\in T}^{|T|-Ts_{sv}} t \cdot q_{vsct} + \sum_{s' \ge s}^{s' \le |S_c|} Ti_{vs'c}\Big) + M \cdot (1 - r_{vc}) \qquad \forall\, v \in V, s \in S_c, c \in C \tag{18}$$

$$Ft_v \ge \Big(\sum_{t=1}^{|T|-Ts_{sv}} t \cdot z_{vsct} - \sum_{s' \ge s}^{s' \le |S_c|} Te_{v,s'+1,c}\Big) - M \cdot (1 - o_{vc}) \qquad \forall\, v \in V, s \in S_c, c \in C \tag{19}$$

$$Ft_v \le \Big(\sum_{t=1}^{|T|-Ts_{sv}} t \cdot z_{vsct} - \sum_{s' \ge s}^{s' \le |S_c|} Te_{v,s'+1,c}\Big) + M \cdot (1 - o_{vc}) \qquad \forall\, v \in V, s \in S_c, c \in C \tag{20}$$

$$St_v \ge A_v + \sum_{c\in C}\sum_{s\in S_c} Ti_{vsc} \cdot r_{vc} \qquad \forall\, v \in V \tag{21}$$

$$\sum_{t' \ge t}^{t+max(Ti_{vsc},Te_{v'sc})-1} q_{vsct'} + z_{v'sct'} \le 1 \qquad \forall (v \wedge v') \in V, v' \ne v, s \in SC_c, c \in C, t \le |T| - Ts_{sv} \tag{22}$$

$$\sum_{v \in V} q_{vsct} \leq NV \qquad \forall s \in S_c, c \in C, t \in T \tag{23}$$

$$\sum_{\substack{v \in V \\ t+Ti_{vsc}-1}} z_{vsct} \leq NV \qquad \forall s \in S_c, c \in C, t \leq |T| - Ts_{sv} \tag{24}$$

$$\sum_{t \in TM} q_{vcst} = r_{vc} \qquad \forall v \in VH, s \in SH_c, c \in C \tag{25}$$

$$\sum_{\substack{t \in TM \\ t+Te_{vsc}-1}} z_{vcst} = o_{vc} \qquad \forall v \in VH, s \in SH_c, c \in C \tag{26}$$

$$\sum_{\substack{t \in TM \\ t \leq |T| - Ts_{sv}}} z_{vcst} = o_{vc} \qquad \forall v \in VH, s \in SH_c, c \in C \tag{27}$$

$$Wa_v = St_v - A_v - \sum_{c \in C} \sum_{s \in S_c} Ti_{vsc} \cdot r_{vc} \qquad \forall v \in V \tag{28}$$

$$Wb_v = Ft_v - St_v - \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} pt_v \cdot y_{vbt} \qquad \forall v \in V \tag{29}$$

$$CVF_v = CA_v \cdot FCA \cdot PA_v \cdot Wa_v \qquad \forall v \in V \tag{30}$$

$$CVC_v = \sum_{c \in C} \sum_{s \in S_c} [CP_v \cdot FCP \cdot (Ti_{vsc} \cdot r_{vc} \cdot PC_v + Te_{vsc} \cdot o_{vc} \cdot PD_v) + CA_v \cdot FCA \cdot PA_v \cdot (Ti_{vsc} \cdot r_{vc} + Te_{vsc} \cdot o_{vc})] \qquad \forall v \in VC$$

$$CVD_v = \sum_{c \in C} \sum_{s \in S_c} [CP_v \cdot FCP \cdot (Ti_{vsc} \cdot r_{vc} \cdot PD_v + Te_{vsc} \cdot o_{vc} \cdot PC_v) + CA_v \cdot FCA \cdot PA_v \cdot (Ti_{vsc} \cdot r_{vc} + Te_{vsc} \cdot o_{vc})] \qquad \forall v \in VD \tag{31}$$

$$EMF_{vk} = FES_k \cdot PA_v \cdot Wa_v \qquad \forall v \in V, k \in K \tag{32}$$

$$EMC_{vk} = FEM_k \cdot \sum_{c \in C} \sum_{s \in S_c} (Ti_{vsc} \cdot r_{vc} \cdot PC_v + Te_{vsc} \cdot o_{vc} \cdot PD_v) + FES_k \cdot \sum_{c \in C} \sum_{s \in S_c} PA_v \cdot (Ti_{vsc} \cdot r_{vc} + Te_{vsc} \cdot o_{vc}) \qquad \forall v \in VC, k \in K \tag{33}$$

$$EMD_{vk} = FEM_k \cdot \sum_{c \in C} \sum_{s \in S_c} (Ti_{vsc} \cdot r_{vc} \cdot PD_v + Te_{vsc} \cdot o_{vc} \cdot PC_v) + FES_k \cdot \sum_{c \in C} \sum_{s \in S_c} PA_v \cdot (Ti_{vsc} \cdot r_{vc} + Te_{vsc} \cdot o_{vc}) \qquad \forall v \in VD, k \in K \tag{34}$$

$$u_{vb} \leq \sum_{t \in T} y_{vbt} \qquad \forall v \in V, b \in B \tag{35}$$

$$CVB_v \geq CA_v \cdot FCP \cdot PA_v \cdot (Ft_v - St_v) - M \cdot \sum_{b \in B} u_{vb} \qquad \forall v \in V \tag{36}$$

$$CVB_v \leq M \cdot (1 - \sum_{b \in B} u_{vb}) \qquad \forall v \in V \tag{37}$$

$$EMB_{vk} \geq FES_k \cdot PA_v \cdot (Wb_v + \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} pt_{vb} \cdot y_{vbt}) - M \cdot u_{vb} \qquad \forall v \in V, k \in K \tag{38}$$

$$CEB_v \geq CE_v \cdot (Ft_v - St_v) - M \cdot (1 - u_{vb}) \qquad \forall v \in V, b \in B \tag{39}$$

La Ecuación (1) define la primera función objetivo, que minimiza el costo total de los buques $CVT$, considerando los costos de navegación, de espera en fondeadero y muelle, y el costo de utilizar energía provista por el puerto. La función objetivo en la Ecuación (2) minimiza las emisiones de GEI generadas por los buques $EMT$ desde el momento en que arriban al fondeadero hasta que hasta que terminan de cruzar el canal de salida del puerto, incluyendo los trayectos de entrada y salida a través de alguno de los canales. La última función objetivo en la Ecuación (3) minimiza el tiempo total de permanencia de los buques en el puerto $TPT$.

Las variables binarias $y_{vbt}$ y $x_{vbt}$ se definen para indicar el periodo en el que cada buque se asigna a un muelle y los periodos en los que permanece atracado, respectivamente. Así, la Ecuación (4) garantiza que a cada buque $v$ se le asigne un solo muelle $b$ en un único periodo $t$, mientras que la Ecuación (5) asegura que solo un barco atraque en el muelle $b$ por periodo. El tiempo de inicio del procesamiento del barco $St_v$ en el puerto se define en la Ecuación (6). Las Ecuaciones (7) y (8) aseguran que el buque realice sus actividades de carga/descarga en el muelle $b$ durante periodos consecutivos iguales al tiempo $pt_{vb}$. La Ecuación (9) calcula el tiempo en el que finaliza la estadía del barco $v$ en el muelle asignado $Ft_v$. Las Ecuaciones (10) y (11) determinan que los barcos no superen las limitaciones de eslora y calado permitidas en el muelle asignado. Si el buque $v$ atraca en el muelle $b$ en un periodo posterior al atraque de $v'$, la Ecuación (12) determina que inicie su procesamiento después que el barco $v'$ finalice sus operaciones. Esta última restricción impide la superposición en tiempo y espacio logrando que si el barco $v$ debe esperar para poder salir del puerto luego de completar sus tareas, la espera se realice en el muelle donde se atendió.

Las Ecuaciones (13) y (14) garantizan que los barcos utilicen un solo canal tanto para ingresar como para salir del puerto mediante las variables binarias $r_{vc}$ y $o_{vc}$, respectivamente. Si el buque $v$ usa el canal $c$ para entrar/salir, las Ecuaciones (15) y (16), mediante las variables binarias $q_{vsct}$ y $z_{vsct}$, aseguran que ingrese y egrese de cada sección $s$ del canal en un único período $t$. Las Ecuaciones (17) y (18) definen que el inicio del procesamiento del buque sea posterior al tiempo incurrido en transitar todas las secciones del canal seleccionado para ingresar mientras que las Ecuaciones (19) y (20) establecen que el barco comience a cruzar por los segmentos del canal por el cual abandona el puerto luego de finalizada su estadía en el muelle. La Ecuación (21) determina que el buque $v$ comience sus actividades en el puerto posterior a su arribo y una vez que cruce por todos los segmentos del canal de ingreso. La Ecuación (22) asegura que no existan cruces de buques en las secciones restringidas $SC_c$.

Las Ecuaciones (23) y (24) limitan el número máximo de barcos que pueden entran o salir del canal, en cada periodo. Las Ecuaciones (25) y (26) restringen a los barcos de gran calado $VH$ a transitar secciones restringidas por marea en los intervalos de marea alta $TM$. Las Ecuaciones (27) y (28) calculan los tiempos de espera de cada buque, de ser necesarios, tanto en el fondeadero antes de entrar al puerto como en el muelle asignado una vez terminadas sus operaciones, respectivamente.

La Ecuación (29) calcula el costo de espera del barco en el fondeadero $CVF_v$, si la hubiere, mientras que las Ecuaciones (30) y (31) calculan los costos de los buques durante su navegación en los canales distinguiendo si ingresan al puerto con carga $CVC_v$ y en lastre $CVD_v$, respectivamente. En los canales los buques utilizan tanto el motor principal para la navegación como el auxiliar para proveer energía a bordo. De manera similar, la Ecuación (32) calcula las emisiones del gas $k$ proveniente del combustible del motor auxiliar cuando el barco espera en el fondeadero $EMF_{vk}$ y las Ecuaciones (33) y (34) las emisiones de cada gas $k$ producto del funcionamiento del motor principal y el auxiliar al navegar por los canales, ingresando cargado $EMC_{vk}$ y descargado $EMD_{vk}$, respectivamente.

El uso de energía eléctrica por parte del buque $v$ en el muelle $b$ se representa con la variable binaria $u_{vb}$. Así, si el barco $v$ no se asigna al muelle $b$ en ningún periodo, $u_{vb}$ debe ser cero como lo establece la Ecuación (35). Si el buque no utiliza la energía del muelle $b$ ($u_{vb} = 0$), entonces se utiliza el motor auxiliar para generarla por lo que las Ecuaciones (36)-(37) calculan el costo del barco $CVB_v$ y la Ecuación (38) las emisiones durante su permanencia en el muelle, $EMB_{vk}$. Por otro lado, si $u_{vb} = 1$, la Ecuación (39) computa el costo por utilizar la energía del muelle, $CEB_v$.

Finalmente, las Ecuaciones (12), (17)-(20) y (36)-(39) son restricciones de tipo big-M, donde $M$ es un numero lo suficientemente grande como para que la restricción sea redundante si las variables binarias son iguales a cero, excepto (36) y (38) que lo son cuando las variables binarias toman valor 1.

## 4. MÉTODO DE RESOLUCIÓN

Para resolver el modelo MOMILP propuesto se aplicó una variante del método ε-*constraint* conocida como AUGMECON2 (*Augmented* ε-*constraint method*), desarrollada por Mavrotas et al. (2013). Este enfoque mejora el AUGMECON original (Mavrotas et al., 2009). al combinar la optimización lexicográfica para establecer cotas en cada función objetivo con un procedimiento que evita generar soluciones redundantes. La técnica calcula los valores extremos de cada objetivo, define rangos a partir de ellos y los divide en intervalos equidistantes, donde el número de intervalos determina la densidad del conjunto de soluciones eficientes. A continuación, formula un problema iterativo que optimiza una función objetivo principal mientras incorpora las demás como restricciones, cuyos valores provienen del paso anterior. Su rasgo distintivo es el coeficiente de *bypass*, que evita soluciones redundantes y reduce el tiempo de cómputo sin afectar la calidad de la exploración del frente de Pareto, garantizando la obtención de soluciones eficientes.

## 5. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio considera un puerto con $|B|$ = 5 muelles al que arriban un total de $|V|$ = 8 buques que deben ser atendidos dentro de un horizonte de planificación de $H$= 3 días, discretizado en períodos de una hora ($|T| = 72$). El acceso al puerto se realiza a través de $|C|$ = 2 canales de diferente longitud divididos en 3 y 2 secciones ($|S_1| = 3, |S_2| = 2$). Dado que el puerto restringe la velocidad de los barcos dentro de estas vías de acceso, el tiempo requerido para circular depende solo de su longitud. Así, los buques demoran 3h en transitar el primer segmento (*s*1) y 2h los otros dos (*s*2 y *s*3) del canal 1 (*c*1), mientras que tardan 3h en ambas secciones del canal 2 (*c*2). En cuanto a las restricciones de circulación, la sección *s*2 de *c*1 es de ancho reducido, por lo que no se permite el cruce de barcos, mientras que por la profundidad de *s*1 los barcos de gran calado deben cruzarlo en la marea alta. En *c*2, tanto *s*1 como *s*2 están restringidos en ancho y profundidad. Los muelles *b*1, *b*2, *b*3 y *b*5 admiten hasta 230m de eslora y 15m de calado, mientras que *b*4 hasta 210m y 13m.

Los buques se clasifican en Handysize, Handymax y Panamax según su tamaño, presentando potencias asociadas a cada categoría. Sus esloras $L_v$ y calados $D_v$ son, respectivamente, 180m y 10m para Handysize, 200m y 12m para Handymax, y 230m y 14m para Panamax. La potencia del motor auxiliar es de 180 kW, 260 kW y 420 kW mientras que la del motor principal es de 3500 kW, 5000 kW y 6750 kW al navegar descargados, y de 5500 kW, 7500 kW y 10000 kW cuando estan cargados. En este caso, los buques *v*4 y *v*8 son Handysize, *v*2, *v*5 y *v*7 Handymax, y *v*1, *v*3 y *v*6 Panamax, (estos últimos considerados de gran calado, $VH$). Los barcos *v*1, *v*4, *v*6 y *v*7 ingresan al puerto sin carga.

Se consideraron 2 GEI, $CO_2$ (*k*1) y $N_2O$ (*k*2). Sus factores de emisión son: $FES_{k1}$= 695 g $CO_{2eq}$/kWh y $FES_{k2}$ = 8 g $CO_{2eq}$/kWh para el combustible del motor auxiliar y $FEM_{k1}$= 607 g $CO_{2eq}$ /kWh y $FEM_{k2}$= 8 g $CO_{2eq}$/kWh, en el caso del motor principal. Los costos de combustibles (2025) son $CA_v$ = 695 US$/tn para el motor auxiliar y $CP_v$ = 420 US$/tn (extraídos de *World Bunker Prices*) con $FCP_v$ = 215 g/kWh el consumo específico de combustible del motor principal y $FCA_v$ = 217 g/kWh para el motor auxiliar (EPA, 2022). El costo de energía en el muelle es de $CE_v = (0{,}2 \cdot PA_v)$ US$/h.

La formulación MOMILP se implementó en el software GAMS 43.4.1, empleando el código CPLEX 22.1.1.0 y se ejecutó en una PC Intel(R) Core (TM) i7-6700, 3.4 GHz, 8 GB RAM. El problema involucra 11.691 variables de las cuales 11.560 son binarias y 36.607 restricciones. Considerando los costos como objetivo principal en el método AUGMECON2 y dividiendo el rango de cada criterio en 100 intervalos, se obtuvieron 152 puntos de Pareto con una diferencia de integralidad de 0% en todas las iteraciones.

Las Figuras 2-4 ilustran en detalle la ubicación y actividad de cada barco en cada período del horizonte de planificación cuando se reduce el costo, las emisiones y el tiempo total, respectivamente, mientras que la Tabla 1, presenta la matriz de pagos. En las figuras se utilizaron distintos colores para diferenciar las etapas por las que transita cada buque mientras que la longitud de estas determina el tiempo que permanece en cada una de ellas. Además, los canales se diferencian mediante variaciones en la intensidad de los colores, siendo las secciones más oscuras, las correspondientes al canal *c*2. Las letras S y B, marcan los períodos en que cada barco transita cada segmento del canal seleccionado para ingresar/salir del puerto y aquellos en los que se encuentra atracado en un muelle, respectivamente. Los períodos de marea alta se muestran con celdas en color celeste claro en el fondo y los tiempos de espera tanto en el fondeadero como en el muelle se indican de un color gris y amarillo, respectivamente.

Como se puede ver en la Figura 2, casi todos los buques utilizan el canal más corto (*c*2) para disminuir los costos de navegación, aunque esto implique esperas prolongadas, tanto en el muelle como en el fondeadero. La excepción son los buques de gran calado *v*1 y *v*6, que ingresan por *c*1. Si bien arriban en un intervalo de marea alta, no disponen del tiempo suficiente para cruzar las secciones restringidas *s*1 y *s*2 de *c*2. Por ello, prefieren ingresan por *c*1, donde solo *s*1 presenta restricción de profundidad. De esta forma, evitan esperas de 11 h (*v*1) y 9 h (*v*6) hasta el siguiente intervalo de marea alta, lo que habría generado elevados costos en el fondeadero. El buque *v*3, aunque podría haber entrado por *c*1, espera 9 h en el fondeadero porque todos los muelles en los que puede atracar (*b*1-*b*3 y *b*5) estaban ocupados. A su vez, este barco, en lugar de salir del puerto por *c*1, incurre en una espera de 10 h el muelle *b*1 hasta la siguiente ventana de marea alta, necesaria para cruzar las secciones restringidas de *c*2. En este caso, el costo de una hora de navegación adicional por *c*1 resulta superior al costo de todo ese periodo de espera. Asimismo, se observa que los buques *v*2 y *v*5, deben esperar en el muelle para no cruzarse con los barcos entrantes *v*7 y *v*3, respectivamente, en *s*1 y *s*2 de *c*2. Al minimizar costos, los buques no utilizan la energía del puerto debido a su alto costo.

*Tabla 1 Matriz de pagos con los valores de las funciones objetivo.*

| | $CVT$ [US$] | $EMT$ [tn $CO_{2eq}$] | $TPT$ [h] |
|---|---|---|---|
| $CVT$ [US$] | 71.374 | 76.271 | 73.515 |
| $EMT$ [tn $CO_{2eq}$] | 464,8 | 420,9 | 482 |
| $TPT$ [h] | 304 | 351 | 282 |

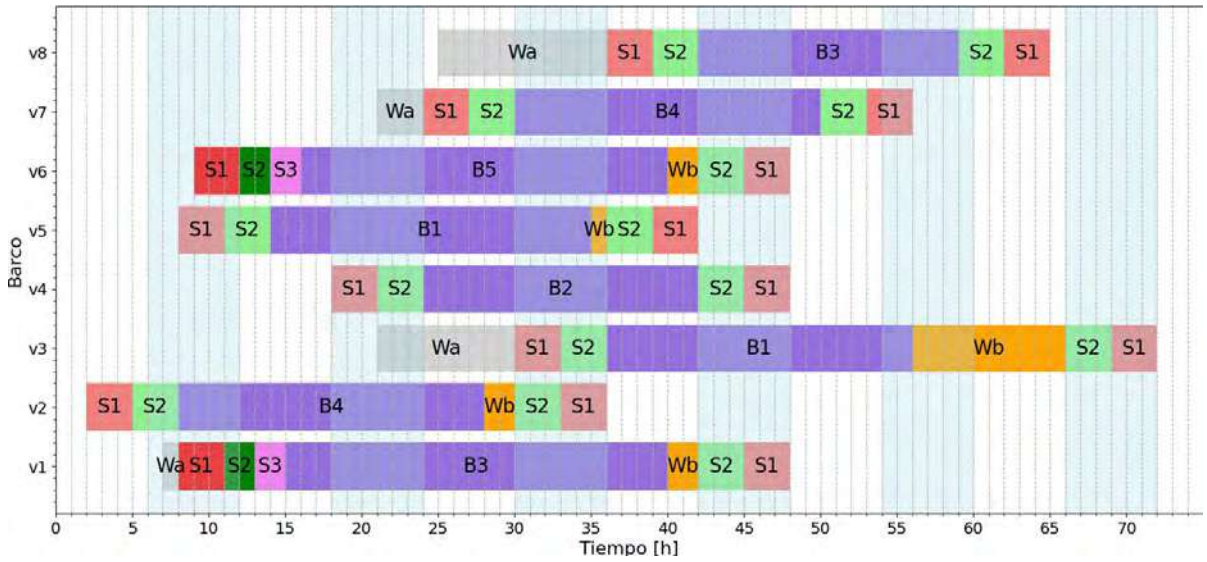



*Figura 2 Movimiento de los barcos a lo largo del horizonte de planificación al minimizar costos.*

Analizando los resultados al minimizar las emisiones, se observa que todos los buques utilizan energía eléctrica del puerto durante su estadía en los muelles. Esta solución reduce a cero las emisiones de GEI durante las operaciones de carga/descarga y en los periodos de espera en el muelle, aunque como se muestra en la Tabla 1, genera los mayores costos y tiempos de permanencia. En la Figura 3 se aprecia que siempre se selecciona el canal *c*2 por ser más corto, ya que recorrer *c*1 implicaría una hora adicional de navegación y, por lo tanto, mayores emisiones. Se registran además esperas prolongadas tanto en el fondeadero como en los muelles. En el fondeadero, los barcos *v*7 y *v*8 deben esperar la liberación de los muelles *b*5 y *b*4, respectivamente, que se encontraban ocupados a su arribo, mientras que los buques de gran calado *v*1, *v*3 y *v*6 deben aguardar al siguiente intervalo de marea alta para poder circular por *c*2. En el muelle, todos los barcos presentan demoras, siendo más significativas para *v*1, *v*3, *v*7 y *v*8. En particular, los buques de gran calado *v*1, *v*3 y *v*6, experimentan esperas de 5, 10 y 3h, respectivamente, debido a la necesidad de esperar al inicio de intervalos de marea alta para circular por los segmentos *s*1 y *s*2 restringidos por profundidad.

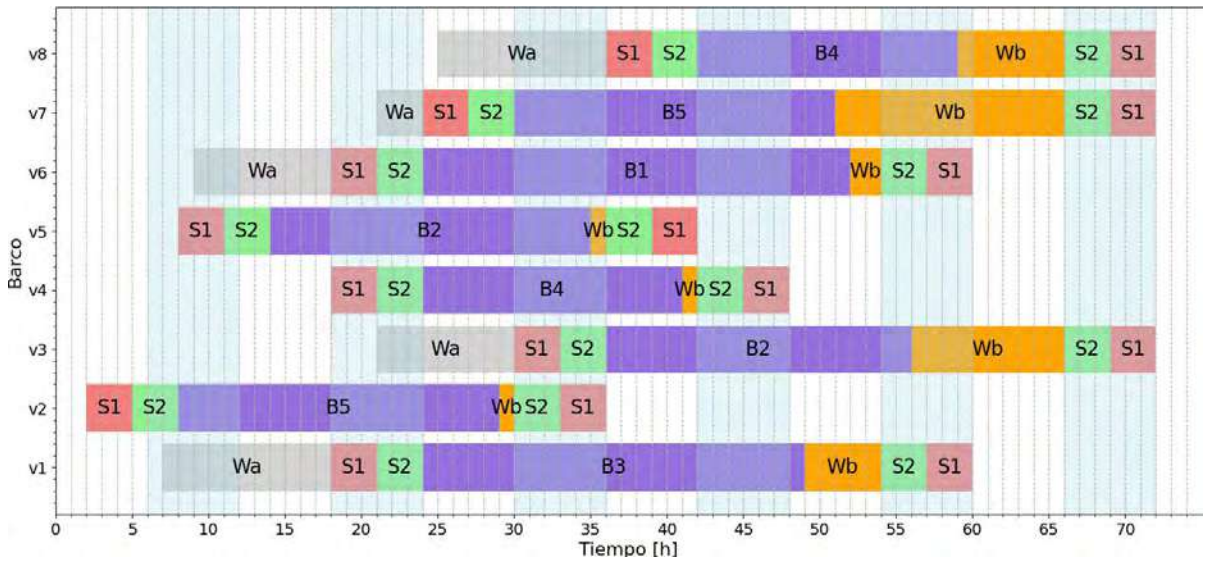



*Figura 3 Movimiento de los barcos a lo largo del horizonte de planificación al reducir emisiones.*

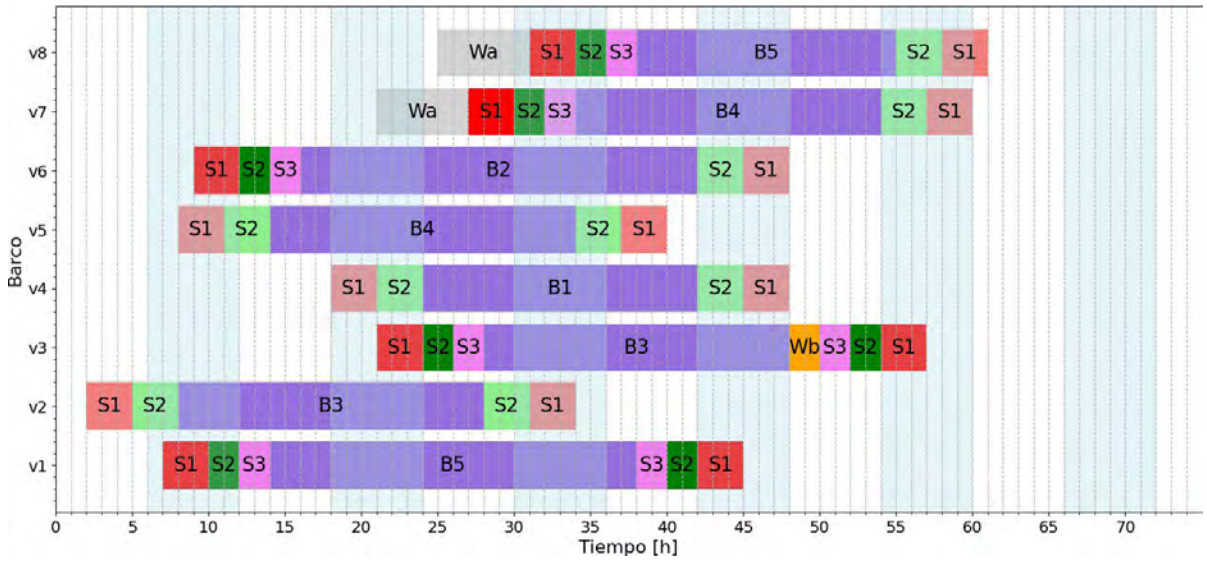



*Figura 4 Movimiento de los barcos a lo largo del horizonte de planificación al minimizar tiempo.*

Como se puede ver en la Tabla 1, al minimizar el tiempo total de permanencia se obtienen los valores más altos de emisiones. Esto ocurre porque, como se observa en la Figura 4, con el fin de reducir tiempos de espera, tanto en el fondeadero como en el muelle, los buques utilizaron con mayor frecuencia el canal más largo ($c1$). Si bien esta estrategia redujo el tiempo, se incrementaron las emisiones, ya que cuando el buque se encuentra en movimiento utilizando el motor principal es la instancia donde más gases emite. Los periodos de 6 h de espera en el fondeadero de los barcos $v7$ y $v8$ ocurren porque los 5 muelles disponibles estaban ocupados cuando arriban al puerto, mientras que la espera del buque de gran calado $v3$ en el muelle, se debe a que necesita aguardar a que inicie el ciclo de marea alta para atravesar el segmento restringido $s1$ del canal $c1$.

Finalmente, en la Figura 5 se muestran las soluciones del frente de Pareto obtenidas al resolver el modelo MOMILP mediante AUGMECON2, entre las cuales el tomador de decisión puede seleccionar la que mejor se ajuste a sus preferencias. Todas ellas representan alternativas de compromiso entre los criterios considerados. A modo de ejemplo, si se selecciona como solución de compromiso el punto señalado en rojo en la Figura 5, se obtiene un costo total de las embarcaciones de 72.930 US$, un tiempo total de permanencia de 310 h y un total de emisiones de 440,08 tn $CO_{2eq}$. Este punto representa

un incremento del 2,1 % en costos, del 4,4% en emisiones y del 9% en el tiempo total de permanencia respecto al valor óptimo para cada función objetivo.

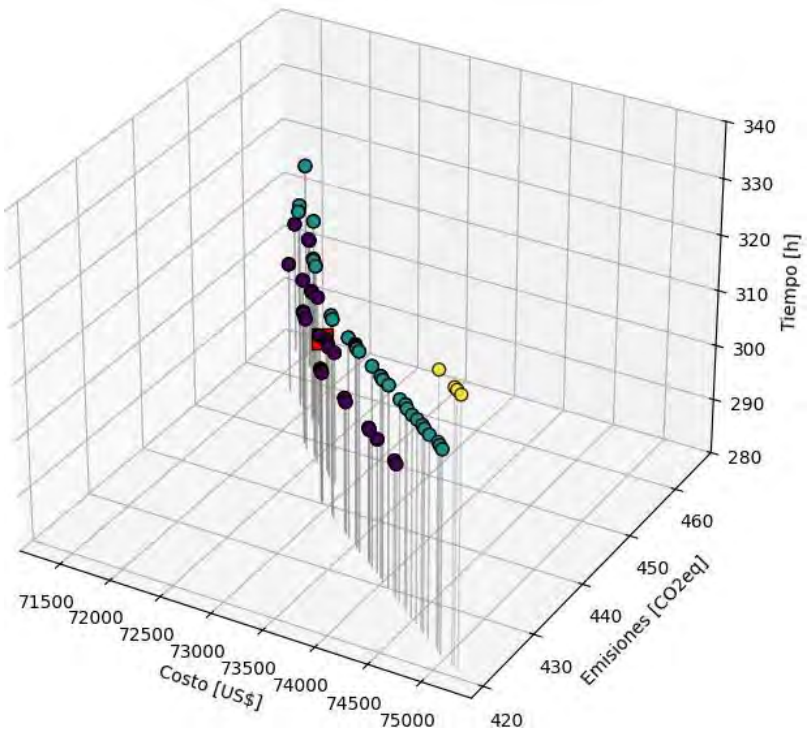



*Figura 5 Frente de Pareto.*

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un modelo multiperiodo MOMILP para asignar sitios de atraque a buques de diversas características y programar su acceso al puerto minimizando sus costos totales, las emisiones de GEI que generan y sus tiempos de permanencia. Una contribución relevante de la formulación es la incorporación de múltiples canales de acceso, cada uno dividido en diversos segmentos con restricciones particulares de cruce, calado y mareas, lo que constituye una representación más realista de las condiciones operativas de los puertos. Además, se incorpora la posibilidad de utilizar energía eléctrica provista desde tierra durante la estadía de los barcos en los muelles, reduciendo las emisiones asociadas al uso de los motores auxiliares.

El modelo multiobjetivo se resolvió utilizando el método AUGMECON2, lo que permitió obtener un conjunto de soluciones eficientes entre las cuales el tomador de decisión puede seleccionar la alternativa más alineada con sus preferencias.

La aplicación a un caso de estudio validó la formulación y los resultados evidenciaron su capacidad para adaptarse a las distintas restricciones operativas y de navegación presentes en muchos puertos, así como el impacto de los criterios en las decisiones operativas. Al minimizar costos los buques utilizan el canal más corto y evitan el uso de energía eléctrica del puerto, aunque esto implica esperas prolongadas. Al reducir emisiones, se favorece el uso de energía de tierra y también del canal más corto, a costa de mayores costos y demoras. Finalmente, al minimizar tiempos de permanencia, los barcos recurren con mayor frecuencia al canal más largo, reduciendo las esperas, pero incrementando emisiones. Estos resultados muestran claramente los compromisos existentes entre los tres objetivos.

El modelo propuesto en este trabajo constituye una herramienta útil para evaluar las relaciones de compromiso entre costos, emisiones y tiempos de permanencia, y para orientar a entes reguladores y autoridades portuarias, en el establecimiento de políticas y metas que contemplen simultáneamente la eficiencia económica, la sostenibilidad ambiental y el desempeño operativo.

## 7. REFERENCIAS


Buhrkal, K., Zuglian, S., Ropke, S., Larsen, J., & Lusby, R. (2011). Models for the discrete berth allocation problem: A computational comparison. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47*(*4), 461-473

Çağlayan, Ö., & Aymelek, M. (2024). An Integrated Multi-Criteria Decision Support Model for Sustainable Ship Queuing Policy Application via Vessel Traffic Service (VTS). *Sustainability*, 16(11), 4615.

Cordeau, J. F., Laporte, G., Legato, P., & Moccia, L. (2005). Models and tabu search heuristics for the berth-allocation problem. *Transportation Science*, 39, 526-538.

Cheimanoff, N., Fontane, F., Kitri, M. N., & Tchernev, N. (2022). Exact and heuristic methods for the berth allocation problem with multiple continuous quays in tidal bulk terminals. *Expert Systems with Applications*, 201, 117141.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Jiang, X., Zhong, M., Shi, J., Li, W., Sui, Y., & Dou, Y. (2022). Overall scheduling model for vessels scheduling and berth allocation for ports with restricted channels that considers carbon emissions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1757.

Jos, B. C., Harimanikandan, M., Rajendran, C., & Ziegler, H. (2019). Minimum cost berth allocation problem in maritime logistics: new mixed integer programming models. *Sādhanā*, 44(6), 149.

Lalla-Ruiz, E., Shi, X., Voß, S.: The waterway ship scheduling problem. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 60, 191-209, (2018)

Li, J., Zhang, X., Yang, B., & Wang, N. (2021). Vessel traffic scheduling optimization for restricted channel in ports. *Computers and Industrial Engineering*, 152, 107014.

Ma, W., Ma, D., Ma, Y., Zhang, J., & Wang, D. (2021). Green maritime: A routing and speed multi-objective optimization strategy. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127179.

Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems*. Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.

Mavrotas, G., & Florios, K. (2013). An improved version of the augmented ε-constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. Applied mathematics and computation, 219(18), 9652-9669.

Qi, J., Wang, S., & Peng, C. (2020). Shore power management for maritime transportation: Status and perspectives. *Maritime Transport Research*, 1, 100004.

Skoko, I., Stanivuk, T., Franic, B., & Bozic, D. (2024). Comparative Analysis of CO2 Emissions, Fuel Consumption, and Fuel Costs of Diesel and Hybrid Dredger Ship Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 999.

U.S. Environmental Protection Agency. (2022). Ports emissions inventory guidance: Methodologies for estimating port-related and goods movement mobile source emissions (EPA-420-B-22-011). Washington, DC: Author.

Wang, B., Liu, Q., Wang, L., Chen, Y., & Wang, J. (2023). A review of the port carbon emission sources and related emission reduction technical measures. *Environmental Pollution, 320*, 121000.

Zhang, Z., Zhu, Y., Zhu, J., Huang, D., Yin, C., & Li, J. (2025). Collaborative Optimization of Shore Power and Berth Allocation Based on Economic, Environmental, and Operational Efficiency. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(4), 776.

Zhen, L., Liang, Z., Zhuge, D., Lee, L. H., & Chew, E. P. (2017). Daily berth planning in a tidal port with channel flow control. Transportation Research Part B: Methodological, 106, 193-217

Ship & Bunker. (s. f.). World bunker prices. Recuperado en agosto de 2025, de https://shipandbunker.com/prices

# DATOS QUE TRANSFORMAN: REVOLUCIONANDO LA GESTIÓN OPERATIVA EN PYMES METALÚRGICAS CON ANÁLISIS INTELIGENTE

Marozzi, Matias; Odetto, Fabio; Monier Eduardo; Fornari Javier

*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela*

matiasmarozzi@frra.utn.edu.ar; fabio.odetto@frra.utn.edu.ar; ecmonier@gmail.com; javier.fornari@frra.utn.edu.ar

**RESUMEN**

En las pequeñas y medianas empresas argentinas, la falta de integración de la información operativa representa una barrera crítica para la eficiencia en la toma de decisiones, afectando la competitividad, el cumplimiento de plazos y la capacidad de respuesta frente a la demanda del mercado. Este problema se manifiesta particularmente en la gestión de proveedores, donde la fragmentación de datos y la ausencia de criterios objetivos dificultan medir su desempeño, y en el control de inventarios bajo sistemas Kanban, donde la falta de consolidación impide definir parámetros de aprovisionamiento precisos.

El presente estudio aborda un caso real en una empresa metalúrgica, proponiendo una metodología de integración de datos provenientes de las áreas de Administración, Compras y Producción, unificados en un formato estandarizado para facilitar su análisis. A partir de esta base consolidada, se aplicaron técnicas de análisis estadístico descriptivo para identificar patrones de consumo y niveles de aprovisionamiento, complementadas con modelos predictivos de aprendizaje automático orientados a anticipar variaciones en las entregas. La confiabilidad de los proveedores fue evaluada mediante indicadores cuantitativos como porcentaje de cumplimiento y desviación en los tiempos de suministro. Asimismo, se redefinieron los parámetros del sistema Kanban, estableciendo niveles mínimos de stock y ciclos de reposición óptimos que minimicen quiebres y excedentes.

Los resultados evidenciaron que las PyMEs pueden transformar datos dispersos en información accionable mediante herramientas accesibles —como planillas de cálculo y scripts en Python— sin requerir inversiones significativas en infraestructura tecnológica. La depuración y estandarización de la información interna fortalecieron la resiliencia competitiva y permitieron detectar ineficiencias en procesos críticos, optimizando la gestión de inventarios y el cumplimiento de plazos.

En síntesis, el estudio propone un modelo replicable para otras empresas del sector, orientado a profesionalizar la gestión industrial mediante la integración de datos y el uso estratégico de tecnologías digitales, contribuyendo a una industria más eficiente y sostenible en el contexto argentino.

**Palabras Claves:** Análisis de datos, Gestión de inventarios, Sistema Kanban, Confiabilidad de proveedores, competitividad empresarial.

**ABSTRACT**

In Argentine metalworking SMEs, the lack of integrated operational information limits efficient decision-making, particularly in supplier management and inventory control under Kanban systems. This study addresses these challenges through a methodology that integrates data from Administration, Purchasing, and Production departments into a standardized dataset, enabling comprehensive analysis. Using descriptive statistics and machine learning models, it evaluates supplier reliability through quantitative indicators—such as delivery punctuality and lead-time variability—and redefines Kanban parameters to optimize stock levels and replenishment cycles. Expected outcomes include reduced stockouts, improved delivery compliance, and enhanced decision-making supported by consolidated data, establishing a replicable digital model aimed at strengthening competitiveness and fostering sustainable efficiency across Argentina's metalworking industry.

**Keywords**: Data analytics, Inventory management, Kanban system, Supplier reliability, Competitiveness.

## 1. INTRODUCCIÓN

La información derivada del análisis de datos constituye uno de los activos más valiosos para el éxito empresarial, al facilitar la toma de decisiones basadas en evidencia y la optimización de procesos internos (Llave, 2017). Cuando los datos son precisos y procesables, posibilitan identificar oportunidades, anticipar tendencias y sostener ventajas competitivas sostenibles (Cadden et al., 2023). Este enfoque analítico ha demostrado mejorar la retención de clientes y la eficiencia operativa mediante la personalización de estrategias y la reducción de incertidumbre en contextos dinámicos.

No obstante, muchas organizaciones enfrentan la denominada paradoja de los datos: disponen de grandes volúmenes de información, pero carecen de la capacidad para transformarlos en conocimiento accionable (Babalghaith y Aljarallah, 2024). Este desafío se vincula con las “cinco V” del Big Data —Volumen, Velocidad, Variedad, Veracidad y Valor—, donde los principales avances se han concentrado en las tres primeras dimensiones, mientras que la veracidad continúa siendo el mayor obstáculo. Los datos procedentes de fuentes heterogéneas suelen presentar inconsistencias, afectando la fiabilidad del análisis y, en consecuencia, el valor estratégico que de ellos se deriva (Justy et al., 2023). Según un estudio de Gartner y KPMG citado por Capón Albarracín (2025), más del 80% de los directivos desconfía de la calidad de los datos sobre los cuales basa sus decisiones, lo que refuerza la necesidad de desarrollar procesos sólidos de depuración y validación.

En el contexto argentino, caracterizado por volatilidad e inflación, las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) deben adoptar estrategias que les permitan optimizar recursos y mejorar su competitividad. Si bien la digitalización y la inteligencia artificial (IA) emergen como prioridades estratégicas, se observa una brecha entre intención y adopción efectiva, influida por limitaciones culturales y de conocimiento (Godadaw Ayinaddis, 2025; Ul Haq et al., 2025). La información existente se encuentra dispersa en planillas y sistemas aislados, lo que impide un aprovechamiento integral de los datos. Sin embargo, experiencias previas demuestran que la implementación de herramientas accesibles de inteligencia de negocios y minería de datos, como Orange Data Mining, puede transformar datos internos en información útil para la toma de decisiones (Jain y Shao, 2014; Schmitz, 2023).

El presente estudio busca demostrar el valor estratégico de dicha transformación aplicándola a una PyME argentina mediante un protocolo de estandarización y análisis sustentado en herramientas de bajo costo, orientado a optimizar la eficiencia operativa y la gestión de la información.

### 1.1. Fundamentos Teóricos para la Transformación de Datos en PyMEs.

Este estudio se fundamenta en la transformación de datos internos en información accionable, un proceso clave para mejorar la competitividad de las PyMEs, especialmente en contextos volátiles como el argentino. Este enfoque se sustenta en conceptos como la paradoja de los datos y las "cinco V" del Big Data (Volumen, Velocidad, Variedad, Veracidad y Valor), que destacan la brecha entre la acumulación de datos y su explotación estratégica (Cadden et al., 2023). La literatura científica posiciona el análisis de datos como un catalizador para la toma de decisiones informada, mediante metodologías accesibles que no requieren inversiones elevadas, alineándose con la propuesta de utilizar herramientas de bajo costo como planillas de cálculo para depuración y aplicaciones como Orange para Data Mining.

Estudios sistemáticos revelan que las PyMEs enfrentan barreras endógenas (falta de habilidades y cultura organizacional) y exógenas (mercado y competencia), pero pueden superarlas mediante la adopción de Business Intelligence & Analytics (BI&A) enfocada en datos internos (Llave, 2017). Utilizando revisiones sistemáticas de literatura, se categorizan temas como componentes de BI&A, adopción e implementación, enfatizando que las PyMEs rezagadas en BI&A pueden avanzar con soluciones móviles y en la nube (Llave, 2017). De manera similar, análisis bibliométricos confirman que BI&A mejora la ventaja competitiva al integrar mecanismos de conocimiento, transformando datos en insights accionables. Metodologías cuantitativas como el modelado de ecuaciones estructurales con Partial Least Squares (PLS) demuestran que la integración de conocimiento es un habilitador crítico, convirtiendo la orientación emprendedora y el Big Data en capacidades organizacionales para innovación (Cadden et al., 2023). Enfoques cualitativos, como entrevistas semiestructuradas, identifican drivers exógenos (e.g., crisis como COVID-19) como aceleradores de adopción en PyMEs, superando barreras internas (Justy et al., 2023). Además, simulaciones en manufactura apoyan el análisis predictivo y prescriptivo, generando datos virtuales para validar aplicaciones de DA sin costos elevados (Jain y Shao, 2014).

La metodología se posiciona dentro de estas corrientes, extendiendo el marco TOE (Technology-Organization-Environment) con elementos de mindfulness organizacional y relaciones interorganizacionales para BI en PyMEs. Esto sustenta la hipótesis de que el análisis sistemático de datos internos, mediante depuración en spreadsheets y data mining, genera ROI tangible sin inversiones iniciales, alineado con hallazgos de que el apoyo gerencial y gubernamental acelera la adopción (Babalghaith y Aljarallah, 2024).

Adicionalmente, la importancia de la inteligencia artificial (IA) en estos procesos de análisis de datos se resalta, ya que se acelera el trabajo mediante herramientas adaptadas que procesan grandes volúmenes de datos de manera eficiente, ofreciendo atajos como el análisis predictivo automatizado y la generación de insights en tiempo real. (Godadaw Ayinaddis, 2025) Para organizaciones con recursos limitados, como las PyMEs, la adopción de IA proporciona beneficios significativos al reducir la necesidad de habilidades técnicas avanzadas y costos elevados, permitiendo una optimización operativa mediante la mediación de factores organizacionales y ambientales que mejoran el rendimiento general (Ul Haq et al., 2025).

### 1.2 **Avances en Análisis de Datos para la Gestión de PyMEs.**

El avance en la transformación de datos internos en información accionable para PyMEs ha sido ampliamente abordado por la literatura reciente, concentrándose en la adopción de BI&A, sus beneficios y las limitaciones que impone la escasez de recursos. Al menos seis trabajos identificados coinciden en la viabilidad de herramientas de bajo costo para generar conocimiento estratégico, aunque difieren en metodología, alcance y contexto.

(Llave, 2017) desarrolla una revisión sistemática de literatura sobre BI&A en PyMEs, clasificando temas como componentes, soluciones móviles o en la nube, adopción y beneficios. Se concluye que las empresas rezagadas pueden desbloquear valor mediante la explotación de datos internos, reduciendo ineficiencias y mejorando la toma de decisiones, aunque persisten brechas en habilidades analíticas. Este planteo coincide con la estrategia de depuración y minería de datos aplicada en el presente estudio, pero carece de casos en economías emergentes.

Por su parte, (Justy et al., 2023) analizan los impulsores y barreras en la adopción de analítica de datos mediante entrevistas a PyMEs manufactureras y agrícolas. Se observa que los factores externos —como competencia o crisis— influyen más que los internos, mientras que las limitaciones organizacionales y de capacitación resultan determinantes. Esta perspectiva refuerza la relevancia de la cultura de datos, similar a los obstáculos culturales identificados en PyMEs argentinas, aunque se orienta a clasificaciones tipológicas más que a protocolos prácticos.

El rol del Big Data y el marketing analytics en PyMEs es abordado desde la teoría de capacidades dinámicas y modelado PLS (Cadden et al., 2023). Los resultados evidencian que la integración de datos potencia la orientación emprendedora y las capacidades organizacionales en contextos cambiantes. Aunque su enfoque es teórico y cuantitativo, valida la premisa de que los datos cotidianos contienen información estratégica, principio base del enfoque aplicado en este trabajo.

Asimismo, (Babalghaith y Aljarallah, 2024) estudian la adopción de big data analytics mediante un marco de aceptación tecnológica, destacando que el apoyo directivo y gubernamental impulsa la implementación, superando barreras de costo y capacitación. Las expectativas de desempeño emergen como principal motivador, aspecto alineado con las soluciones de bajo costo desarrolladas para PyMEs argentinas, pero con necesidad de adaptación ante la volatilidad económica local.

Un caso práctico de inteligencia de negocios se presenta en (Capón Albarracín, 2025), donde un sistema BI para una cafetería optimiza procesos y decisiones mediante herramientas web y móviles. Este ejemplo demuestra la aplicabilidad de soluciones accesibles en entornos de recursos limitados, en línea con la experiencia local analizada.

Finalmente, (Jain y Shao, 2014) integran simulación industrial con estándares STEP-NC y MTConnect para generar datos virtuales que soportan analítica predictiva y diagnóstica, reduciendo costos y validando metodologías sin necesidad de mediciones físicas.

En conjunto, estos estudios abarcan desde revisiones teóricas hasta aplicaciones prácticas, confirmando que la explotación de datos internos mediante herramientas accesibles constituye una vía viable para que PyMEs en contextos inflacionarios, como el argentino, desarrollen capacidades analíticas sostenibles y generen valor estratégico a partir de información latente.

## 2. METODOLOGÍA

Para el presente estudio se adoptó un enfoque metodológico en cascada conforme a lo expuesto por Saravanos (2025), quien describe este modelo como un proceso estructurado de desarrollo en el que las fases se suceden de manera secuencial y dependiente, garantizando control y trazabilidad en cada etapa. Este esquema comprende la definición de requerimientos, el diseño, la implementación, la verificación y el mantenimiento, las cuales se desarrollan de forma progresiva, aunque con la posibilidad de retroalimentación limitada cuando el contexto lo requiere. En el presente trabajo, las etapas fueron adaptadas a las particularidades del proceso analizado, manteniendo la lógica secuencial y el control sistemático que caracterizan al modelo planteado.

En la primera fase, correspondiente a la recopilación de información, se estableció que los datos debían ser provistos por una empresa PyME en su formato original o bruto, sin alteraciones, a fin de garantizar la fidelidad del material de trabajo y la validez metodológica de los resultados. Una vez cumplida esta instancia, se procedió a la construcción de una planilla estructurada, en la que cada registro quedó asociado a un artículo consignado en una orden de compra.

Posteriormente, en correspondencia con la fase de depuración y preparación de datos, se realizó la limpieza y normalización de la información contenida en la planilla, con el propósito de asegurar la calidad y la consistencia necesarias para su análisis. Esta etapa resultó fundamental, dado que la integridad de los resultados analíticos depende de la fiabilidad del conjunto de datos iniciales.

Finalmente, en la etapa de análisis y evaluación, se empleó una herramienta de acceso público destinada al procesamiento de datos. Mediante su aplicación, fue posible identificar tendencias e hitos de interés, lo que permitió obtener una visión sistemática de la información recopilada y garantizar que el procedimiento se ajustara al enfoque lineal propuesto por la metodología en cascada.

### 2.1. Interacción inicial con la organización proveedora de los datos

Se estableció contacto con una industria metalúrgica, acordando los datos a proveer para su extracción y depuración con el fin de obtener información significativa para la toma de decisiones gerenciales. Tras varias reuniones con la gerencia, donde se evaluaron distintas fuentes —bitácoras de producción, historiales de trabajo de operarios, entre otras—, se definió trabajar con el historial de compras realizadas durante el último año como inside. Los datos se recolectaron en 1210 archivos de planillas codificadas por tipo, número de registro y proveedor (ejemplo: OC48000ProveedorIndustrial.

Los objetivos del trabajo fueron establecidos junto a la gerencia, orientándose a optimizar los procesos de aprovisionamiento y a implementar un sistema Kanban adaptado a las necesidades operativas. En primera instancia, se definieron los materiales críticos y recurrentes a integrar, y se determinó que los tiempos promedio de aprovisionamiento se calcularían según los plazos de entrega derivados de pedidos y facturación, mejorando la planificación de compras y la sincronización con la cadena de suministro. También se priorizó analizar la dispersión de los tiempos de entrega para detectar proveedores con alta variabilidad y negociar mayor estabilidad.

Respecto del inventario, se planteó establecer cantidades óptimas en el punto de pedido considerando demanda promedio y tiempos de reposición, garantizando niveles de stock seguros y menores costos de almacenamiento. Además, se acordó definir la frecuencia óptima de compras —diaria, semanal o mensual— y priorizar materiales de mayor recurrencia, estructurando un cronograma que cubra el 90% de las necesidades sin generar excedentes. Finalmente, se estableció cuantificar el volumen de compras por obra y su distribución temporal, construyendo diagramas de Gantt para analizar la ejecución simultánea, así como calcular la tasa de generación de órdenes de compra para evaluar la carga administrativa y detectar períodos de baja actividad.

### 2.2. Análisis inicial de la información provista

A partir del análisis exhaustivo de los archivos proporcionados, fueron identificados los principales obstáculos que limitan la estandarización y el tratamiento automatizado de la información:

- Se observó que, pese a la estandarización formal, los archivos presentan variaciones en el espaciado y en la cantidad de columnas o filas lo que dificulta su procesamiento.
- Se detectó que los nombres de los proveedores no coinciden con sus denominaciones fiscales, registrándose mediante alias sin una codificación formal en la documentación disponible.

- Se constató la ausencia de información relevante vinculada a los proveedores, lo que limita la trazabilidad y la confiabilidad de los datos.
- Se identificó la falta de codificación de artículos, cuyas descripciones manuales generaron denominaciones dispares de un mismo producto, afectando la comparabilidad de los registros.

Como línea de acción inmediata, se estableció la implementación de un procedimiento automatizado para la extracción y consolidación de datos provenientes de comprobantes en formato Excel. Esta instancia se constituyó en el primer esfuerzo orientado a la construcción de una base de datos integrada, conformada a partir de múltiples archivos individuales, con la finalidad de disponer de un corpus unificado que permita su análisis tanto cuantitativo como cualitativo.

### 2.3. Procesamiento Automático de Datos de Órdenes de Compra desde archivos .xls

El procesamiento de los archivos fue realizado mediante un script desarrollado en Python, configurado para recorrer de manera secuencial todos los documentos almacenados en una carpeta de referencia. La identificación de la información relevante fue llevada a cabo a través de expresiones regulares aplicadas al contenido textual de cada archivo, lo que permitió la detección de campos estructurales recurrentes. Entre los datos a extraer se incluyeron el número de orden, fecha de emisión, nombre del proveedor, cantidad y descripción de los artículos consignados, número de obra al que cada ítem fue asignado, así como las condiciones de entrega y pago establecidas con el proveedor.

La consolidación de los datos no pudo ser alcanzada debido a la variabilidad estructural de los archivos en formato .xls. La presencia de columnas adicionales, la incorporación irregular de filas y la modificación manual de encabezados de las tablas dificultaron la extracción estandarizada de la información, generando inconsistencias que impidieron la construcción de una base tabular uniforme.

Los resultados de este primer intento de sistematización pusieron en evidencia la necesidad de aplicar instancias previas de depuración y estandarización de los archivos fuente, a fin de garantizar la viabilidad de procesos posteriores de integración y análisis de datos. Como alternativa metodológica, se optó por transformar los archivos desde el formato .xls a PDF y emplear herramientas que no dependieran de la localización específica de filas o celdas, buscando reducir la sensibilidad del procedimiento frente a modificaciones manuales o variaciones estructurales.

### 2.4. Conversión Automática de OC .xls a Formato PDF y de lista de Proveedores de PDF a .xls

Por las dificultades observadas se modificó el plan inicial para automatizar la conversión de datos mediante inteligencia artificial, obteniendo scripts en Python que facilitaran la escritura de código. Se generó un script que transformó con fidelidad todos los archivos de planillas en PDF, ya que las herramientas públicas disponibles sin membresía presentan limitaciones en el procesamiento y distorsionan estructuras, dificultando la extracción consolidada. Además, se buscó garantizar la escalabilidad del proceso, dado que el total de archivos a procesar supera los 40.000 que quedaran fuera del presente estudio.

Para su desarrollo se adjuntó un modelo de orden de compra sin datos reales a una herramienta de IA con el siguiente prompt: : "*Genera un script en Python que recorra una carpeta con archivos Excel (`.xls` y `.xlsx`), verifique con Pandas cuáles hojas no están vacías, convierta los archivos completos a PDF usando LibreOffice en modo headless, divida el PDF resultante en hojas individuales utilizando PyPDF2 y guarde cada hoja válida como un archivo PDF separado en una carpeta de salida en el escritorio del usuario. Incluye manejo de errores, validación de existencia de carpetas y cierre forzado de procesos de LibreOffice al inicio y al final del proceso*."

El código fue ajustado y depurado para automatizar la conversión y segmentación de archivos Excel a documentos PDF individuales mediante LibreOffice en modo headless y comandos subprocess. Cada archivo fue leído con Pandas y se descartaron hojas vacías con menos de diez filas no nulas para impedir la producción de documentos carentes de información.

Una vez validadas, las planillas se convirtieron en PDF temporales (150–300 KB) mediante la interfaz de comandos de LibreOffice. Estos documentos fueron procesados con PyPDF2, fragmentándose en archivos individuales, nombrados según el archivo original y la hoja correspondiente.

El proceso resultante, de tipo ETL (Extract, Transform, Load), comprendió la extracción y validación de hojas, su conversión a PDF y la carga final en forma de documentos individuales (Khan et al., 2024).

Este enfoque garantizó la replicabilidad del procedimiento y permitió una gestión eficiente de grandes volúmenes de órdenes de compra. (Khan et al., 2024)

### 2.5. Solicitud de información adicional para alcanzar los objetivos propuestos.

Para la obtención de la información correspondiente a los proveedores, se solicitó al área de Administración la provisión de los reportes pertinentes. Dado que estos fueron entregados en formato PDF, se implementó un procedimiento destinado a extraer, depurar y estructurar los datos en un único archivo Excel, con el propósito de posibilitar su integración en etapas analíticas posteriores.

Con el propósito de automatizar la tarea, se recurrió al apoyo de una herramienta de Inteligencia Artificial (IA), a la cual se le solicitó que: "*Escribe un script en Python que recorra un archivo PDF que contiene un listado de proveedore. El script debe abrir el PDF con la librería pdfplumber, extraer el texto de cada página y dividirlo en líneas. Las líneas que correspondan a membretes, encabezados o que no comiencen con un número deben ser descartadas. Para las líneas relevantes, utiliza una expresión regular que permita identificar cuatro campos: número de proveedor, nombre del proveedor, CUIT (o asignar '0' si no existe) y tipo de responsabilidad social (o asignar 'No disponible' si no existe). Todos los registros válidos deben almacenarse en una lista de diccionarios y, al finalizar, convertirse en un DataFrame de pandas y exportarse a un archivo Excel llamado Proveedores.xlsx en la misma carpeta donde obtuve el PDF original. El código debe incluir manejo de errores, mensajes de advertencia cuando al detectar líneas no procesadas y confirmación cuando se genere el archivo Excel*. "

Luego de la depuración del código obtenido, se logró eliminar los membretes institucionales, encabezados y todas aquellas líneas carentes de información relevante. Sobre el conjunto resultante se aplicó el patrón de expresiones regulares diseñado para identificar y segmentar, de manera estructurada, cada elemento de interés. De este modo, se extrajeron los campos de número de proveedor, razón social, CUIT y condición de responsabilidad tributaria. Concluida la fase de extracción y validación, los datos fueron exportados a un archivo Excel con formato estructurado y uniforme.

En síntesis, la metodología aplicada puede definirse como un procedimiento de minería de texto orientado a la estructuración de datos administrativos. La etapa de extracción se centró en la lectura automatizada del documento PDF, la transformación se efectuó mediante filtros y expresiones regulares para depurar los registros, y la carga se realizó sobre un archivo Excel centralizado.

### 2.6. Procesamiento Automático de Datos de Órdenes de Compra desde PDFs.

Nuevamente con la asistencia de una herramienta de Inteligencia Artificial (IA) se desarrolló un nuevo script en Python que, tras diversas iteraciones y ajustes, automatizó la extracción, estandarización y consolidación de los datos contenidos en las órdenes de compra digitalizadas en formato PDF, generando una base unificada en formato .ods.

El procedimiento se inició con la carga de la lista de proveedores obtenida en el paso anterior mediante la librería pandas y el almacenamiento de reglas en archivos JSON, que guardan relaciones entre nombres reales y de fantasía de estos, lo que permitió incorporar conocimiento derivado de intervenciones manuales. La información fue importada utilizando expresiones regulares, eliminando sufijos societarios, símbolos y estandarizando en mayúsculas, lo que facilitó búsquedas difusas y por palabras clave.

De los nombres de archivo de las Órdenes de Compra (OC) en formato PDF se extrajeron las denominaciones de proveedores mediante un esquema mixto que combinó reglas almacenadas en archivos JSON y algoritmos de fuzzy matching, priorizando coincidencias exactas y, en su defecto, búsquedas con umbrales de similitud del 80 % y 90 %. Este procedimiento garantizó la detección tanto de proveedores formales como de aquellos registrados con nombres de fantasía.

Los documentos PDF fueron procesados con pdfplumber, extrayendo texto y aplicando expresiones regulares para obtener los campos relevantes: número de orden, fechas de emisión y entrega, lugar de entrega y forma de pago. De manera paralela, se intentó la extracción automática de tablas con los artículos pedidos; cuando no fue posible, se implementó una alternativa basada en la segmentación del texto, asegurando la resiliencia del método ante variaciones de formato. Cada línea de tabla fue desagregada en atributos como cantidad, descripción del producto, número de obra y tipo de orden. Las fechas fueron convertidas al formato estándar ISO (YYYY-MM-DD), y los tipos de orden (Fabricación (OF) o Servicio (OS)) determinados automáticamente según los patrones alfanuméricos.

Asimismo, se aplicaron reglas semánticas para normalizar fechas expresadas en distintos formatos o términos no numéricos, y se clasificaron los lugares de entrega en categorías predefinidas (“planta industrial”, “proveedor” o “transporte”). Los registros incompletos o inconsistentes fueron descartados mediante rutinas de validación.

El sistema generó un conjunto de datos estructurado y consolidado en un único archivo .ods, tabulado con columnas normalizadas (comprobante, orden, fechas OC y de entrega, proveedor, cantidad, descripción, obra, tipo de orden, lugar y forma de pago). Se garantizaron la ausencia de valores nulos mediante asignaciones por defecto (“0” o “No encontrado”) y la corrección dinámica de inconsistencias. Paralelamente, las reglas de identificación de proveedores fueron actualizadas en un archivo JSON, permitiendo que nuevas asociaciones entre nombres de fantasía y proveedores oficiales quedaran disponibles para procesos futuros.

Si bien el procedimiento demostró alta robustez, se requirió una edición manual mínima (aproximadamente el 1 % de los registros), principalmente en artículos con descripciones extensas y en la carga manual de asociaciones no detectadas automáticamente, lo que reforzó la precisión del sistema y su escalabilidad para implementaciones posteriores.

### 2.7. Anexo de datos para mejorar y completar el análisis

En un debate interno del equipo de trabajo se determinó la necesidad de obtener información referente a la facturación de la empresa para contrastar las fechas de emisión de facturas con las fechas comprometidas de entrega por los proveedores al momento de confeccionar las Órdenes de Compra. Para ello, el área de Administración facilitó el historial de facturación organizado en archivos .ods mensuales con estructuras de columnas homogéneas, lo que permitió su posterior integración en un único archivo disponible para etapas posteriores de análisis.

### 2.8. Depuración y anexo de columnas con información adicional para la generación de la Base de Datos (BD).

A partir de este punto, se trabajó en hojas de cálculo para estructurar los datos destinados al análisis posterior. Al output del paso 2.6, se añadió una columna para incorporar las fechas de facturación de las OC desde el archivo unificado del paso 2.7. con expresiones BUSCARV(). Durante la revisión manual se completaron fechas faltantes y se detectaron errores de carga por parte del área de Administración, principalmente omisiones o duplicaciones de OC, los cuales fueron informados para su corrección.

Se procedió al tokenizado de varias columnas. La columna “comprobante” se generó mediante la función EXTRAER(), obteniendo el acrónimo “OC” de los nombres de archivo, previendo la incorporación futura de otros tipos de comprobantes. Se añadió también la columna “ProvIngres”, con valores booleanos que indican si el proveedor fue ingresado en el sistema de facturación.

Se incorporaron además las columnas “ClasifInterna” y “Kanban”, completadas con asistencia del sector de Compras. La primera permitió clasificar los artículos en categorías estandarizadas (Consumibles, Partes, MO Terceros, Maquina, Equipo, Servicios y Fletes) mediante listas desplegables; la segunda indicó la participación de los artículos en el sistema Kanban.

En cuanto a la columna “Obra”, se efectuó una desagregación más extensa, agregando columnas para identificar el tipo y número de orden (OF, OS entre otros) y asignar un máximo de seis obras por artículo. En los casos que excedieron este límite, se aplicaron criterios de descarte priorizando órdenes internas (OF001) y las más antiguas. Se añadió la columna “CantDeOrd” para contabilizar las órdenes vinculadas a cada artículo.

Una vez finalizado todo el tokenizado y la adición de columnas, se procedió a copiar el contenido de la DB en un nuevo archivo, transfiriendo solo los valores sin las expresiones o fórmulas. Posteriormente, los datos se formatearon para asegurar la estandarización de las fechas, números enteros y reales, y campos de texto.

Con el fin de facilitar análisis posteriores, se incorporaron las columnas “FechaEntrega3”, calculada sumando tres días a la última fecha comprometida por el proveedor contemplando demoras logísticas, y la columna “DifFecha”, que calculó la diferencia entre la entrega comprometida y la de facturación.

Concluido el proceso de tokenizado, los datos fueron copiados a un nuevo archivo, transfiriendo únicamente valores, sin las expresiones o fórmulas, asegurando la estandarización de fechas, números y campos de texto.

### 2.9. Creación del flujo de trabajo en el entorno de ORANGE Data Mining.

En base a los objetivos planteados y a la información obtenida tras el proceso y depuración de datos, se definió la utilización de la herramienta Orange. Esta herramienta proporciona las capacidades de procesamiento robusto necesarias para analizar la base de datos y generar los outputs esperados. Además, Orange es una plataforma de software de código abierto que se emplea para la visualización, el aprendizaje automático y la minería de datos, la cual permite crear flujos de trabajo de análisis de datos de manera visual mediante una interfaz de "arrastrar y soltar" que utiliza "widgets" o componentes. Es gratuita, multiplataforma y está diseñada para que usuarios con diferentes niveles de experiencia puedan explorar y analizar datos, desde expertos en la materia hasta aquellos sin conocimientos profundos de programación. (Schmitz, 2023)

El archivo generado en las etapas previas se incorporó mediante el widget File, constituyendo la base del conjunto de flujos de trabajo. Cada objetivo analítico se abordó de manera independiente, estructurando líneas de procesamiento que permitieron organizar los datos, mejorar su comprensión y detectar posibles procesos no contemplados inicialmente. Durante esta etapa se identificó la necesidad de nuevos campos de tipo booleano, generados directamente dentro del entorno de Orange para facilitar su futura automatización al escalar la extracción de datos desde el sistema de compras.

Previo al análisis exploratorio, se incorporaron tres campos calculados: Tiempo de Aprovisionamiento Real (TAR), Margen de Error (MdE) y Entrega a Tiempo (EAT), definidos para parametrizar el desempeño de los proveedores. El TAR se calculó como la diferencia entre las fechas de facturación y de orden de compra; el ME, como la diferencia entre el TAR y el campo DifFecha del archivo base; y el EAT se estableció como variable binaria (1 si la entrega se realizó dentro del plazo previsto o antes, 0 en caso contrario). Estas variables se añadieron como metadatos en un nuevo dominio de datos (Domain), y posteriormente a una tabla combinada (out_data) que integró las nuevas métricas.

El análisis exploratorio se desarrolló mediante los widgets Feature Statistics, Distributions, Scatter Plot, Box Plot y Correlations, con el propósito de caracterizar la base de datos e identificar patrones, anomalías y relaciones entre variables antes de aplicar modelos predictivos o de clasificación.

En un segundo flujo de trabajo se analizó la temporalidad del proceso de compra. Se reestructuraron los datos integrando múltiples columnas vinculadas a órdenes y obras, estandarizando las fechas y concatenando los identificadores de tipo y número de orden. Con ello se conformó un nuevo DataFrame con las columnas FechaOC y ObraID, destinado a visualización temporal y agrupamiento.

Mediante el widget Select Rows, se eliminaron las órdenes con código OF001 —correspondientes a compras internas o sin adjudicación—, y se agruparon los registros por obra, definiendo las primeras y últimas fechas de compra. Estos datos se visualizaron en un diagrama de Gantt, que permitió observar la simultaneidad de las obras y la distribución temporal del proceso de adquisiciones.

Otro flujo de trabajo abordó la segmentación de las fechas de las órdenes de compra por semana, mes y año, con el objetivo de analizar la carga operativa del área de Compras y detectar picos de actividad. Mediante agrupamientos y conteos definidos sobre la variable FechaOC, y utilizando el widget Line Chart, se obtuvo una representación gráfica de la evolución temporal de las órdenes, facilitando la identificación de concentraciones de trabajo y oportunidades de redistribución.

Finalmente, se estableció un flujo orientado al análisis de los artículos incluidos dentro del sistema Kanban. A través de Select Rows se filtraron los registros relevantes y se evaluó la variabilidad en los tiempos de entrega mediante el widget Scatter Plot. Este análisis permitió observar el comportamiento diferencial de los proveedores dentro del sistema, aportando criterios para su evaluación y futura clasificación en función de su fiabilidad y cumplimiento.

## 3. RESULTADOS

La conformación de la base de datos permitió al sector de Compras disponer de un historial de consulta centralizado, facilitando el proceso de cotización de repuestos. La trazabilidad de los artículos adquiridos por obra fue asegurada, posibilitando identificar rápidamente los registros asociados a cada proyecto. De este modo, se redujeron significativamente los tiempos de búsqueda, ya que la revisión

manual de múltiples órdenes de compra de distintos proveedores —anteriormente requerida para localizar la información correspondiente— fue reemplazada por una consulta instantánea dentro de una planilla de cálculo estructurada. Esta mejora no pudo ser cuantificada con precisión.

Durante el procesamiento de la información, se detectaron y contrastaron anomalías con el departamento de Compras, a fin de validar la precisión de los registros. Errores de carga manual fueron corregidos, mientras que datos incompletos, duplicados o ausentes fueron identificados y rectificados mediante la solicitud de información adicional a las áreas implicadas. Se observó una correlación directa entre las fechas de órdenes de compra y su facturación, visualizándose casos de facturas emitidas con anterioridad a la generación de las OC, evidenciando una falencia en el cumplimiento de los procedimientos de compras establecidos según la norma ISO vigente. Asimismo, se evidenciaron desfasajes en las entregas de determinados proveedores y ligeras desviaciones en artículos bajo sistema Kanban (véase “Ilustración 1”).

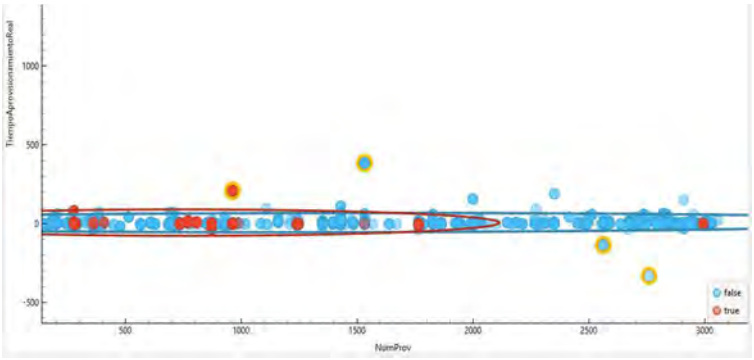



*Ilustración 1- Gráfico Scatter plot relacionando el Número de Proveedor y sus Tiempos de Aprovisionamiento*

Se identificó que los proveedores del sistema Kanban, asociados a números de registro inferiores (elipse roja), correspondían a vínculos comerciales más antiguos, lo que sugiere una preferencia por proveedores consolidados o una limitada incorporación de nuevos limitando oportunidades de negocio y la diversificación de fuentes de aprovisionamiento. A partir del análisis mediante un gráfico Box Plot del “Margen de Error” (MdE) que es la diferencia entre lo comprometido por el proveedor y la entrega real, se evidenció que los servicios de flete presentaron retrasos de hasta 25 días, mientras que los de mano de obra y servicios generales registraron entregas anticipadas de hasta 20 días, reflejando una variabilidad significativa en el cumplimiento de los plazos (véase “Ilustración 2”).

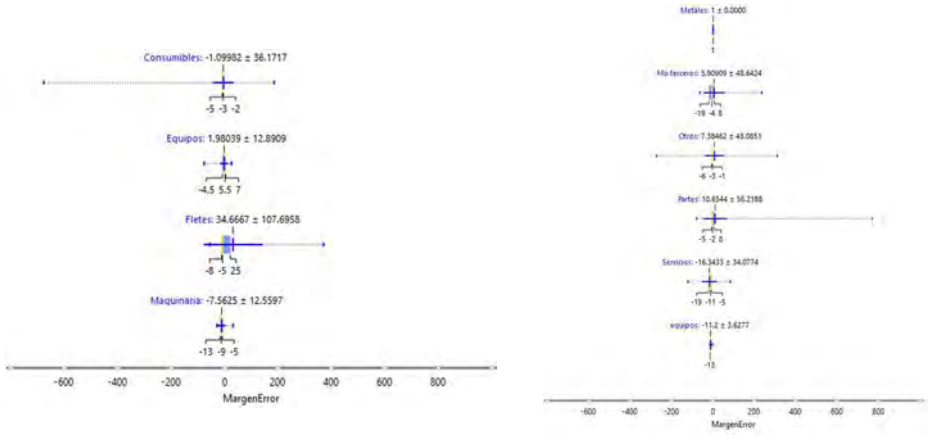



*Ilustración 2 - Gráfico Box Plot relacionando el MdE de entregas agrupadas por Clasificación Interna*

La simultaneidad de obras fue representada mediante un gráfico de Gantt, donde se evidenció una sobrecarga de actividades entre julio y diciembre de 2024, seguida de una marcada disminución atribuida a la caída en las Órdenes de Servicio (OS). Se recomienda realizar un análisis comparativo con años previos para identificar posibles patrones cíclicos en la generación de órdenes de fabricación (OF) y servicio, así como en los procesos de compra asociados (véase “Ilustración 3”). Asimismo, se detectaron procesos de compra excesivamente prolongados en OF vinculadas a bienes de capital, mientras que los servicios presentaron extensiones injustificadas. Se sugiere al área de Compras

revisar la asignación de artículos y modular las compras adicionales en nuevas OS, a fin de mejorar la trazabilidad y reducir distorsiones derivadas de errores de carga manual.

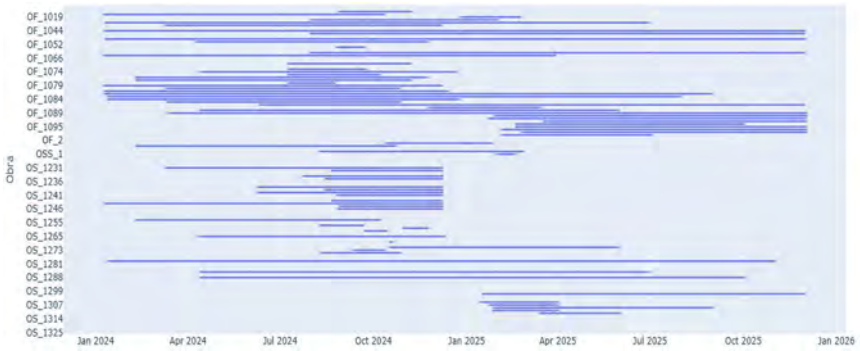



*Ilustración 3 - Diagrama de Gantt de procesos de compras por Obras*

En un segundo gráfico, la simultaneidad de obras en proceso de compra (representada por una línea verde) fue visualizada a lo largo del tiempo evaluado (véase “Ilustración 4”) confirmando lo observado cualitativamente en el Diagrama de Gantt con picos de ordenes activas a fines de 2024.

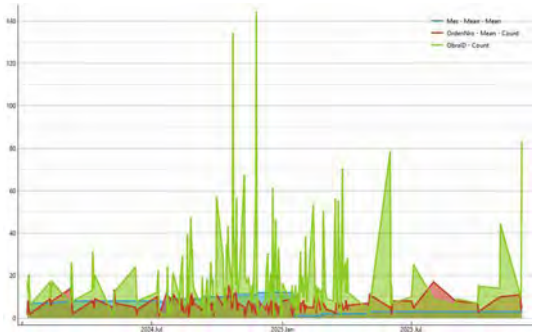


*Ilustración 4 - Gráfico Line Chart que cuenta la cantidad de obras por día*

La generación de órdenes, sin picos significativos en cantidad fue observada, indican una distribución uniforme, a pesar de las elevadas fluctuaciones en la cantidad de obras activas (véase “Ilustración 5”).

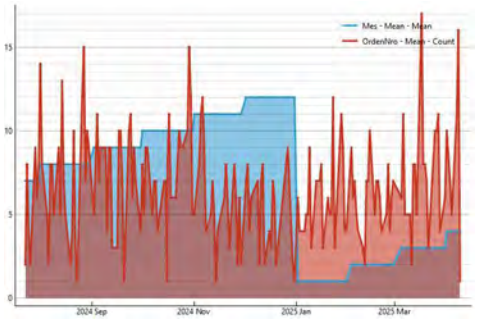



*Ilustración 5 - Gráfico Line Chart que cuenta la cantidad de OC por día*

Por la observación del grafico anterior, mediante el widget Feature Statistic, se determinó que la generación diaria de órdenes de compra (OC) osciló entre 1 y 17, con una media de 7, lo que implicó una carga individual estimada de 3 a 4 órdenes por persona en el equipo de Compras.

En el análisis de productos del sistema Kanban se observaron entregas generalmente regulares, aunque con desviaciones relevantes (véase “Ilustración 6”). Un Scatter Plot permitió identificar incumplimientos significativos del proveedor 1255, con retrasos de más de 200 y 38 días, respectivamente, y del proveedor 2242, con un retraso de 67 días respecto a las fechas originalmente pactadas.

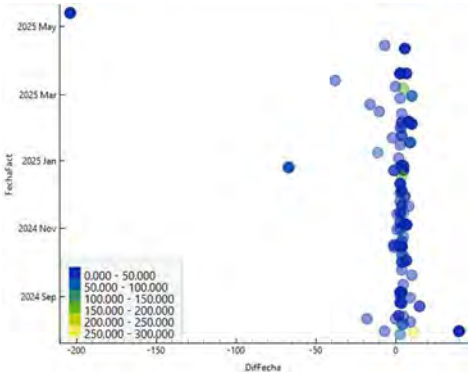



*Ilustración 6 - Gráfico Scatter Plot diferencia entre fecha de OC y Fecha de Factura*

## 4. CONCLUSIONES

La transformación de datos brutos en información accionable fue consolidada como un eje estratégico para el éxito empresarial en contextos de creciente digitalización. Se demostró que las PyMEs argentinas pueden superar la denominada “paradoja de los datos” —donde la información abunda, pero carece de interpretación efectiva— mediante protocolos accesibles y de bajo costo. Este caso evidenció que la depuración y estandarización de datos internos con herramientas básicas (Excel, Google Sheets) y scripts en Python asistidos por inteligencia artificial permiten detectar ineficiencias.

Durante el análisis, fueron detectadas anomalías en el proceso de compras, como facturas generadas antes de las órdenes de compra (OC) y desfasajes en las entregas de proveedores. Los servicios de flete presentaron demoras de hasta 25 días, mientras que los de mano de obra de terceros mostraron anticipos de hasta 20 días. Mediante representaciones gráficas (scatter plots, box plots y diagramas de Gantt) se observaron sobrecargas temporales entre julio y diciembre de 2024, así como una producción diaria promedio de siete OC. Se identificó una tendencia hacia el uso de proveedores antiguos en el sistema Kanban, algunos con incumplimientos significativos, lo que sugiere oportunidades de diversificación y mejora en la gestión de la cadena de suministro.

En el contexto argentino, caracterizado por alta inflación y volatilidad, la brecha entre el interés por digitalizarse (70 % de las MiPymes interesadas en IA) y su ejecución efectiva continúa siendo un obstáculo. La dispersión de datos en formatos heterogéneos fue superada mediante conversiones y automatizaciones parciales, demostrando la viabilidad de enfoques escalables para volúmenes no clasificados como Big Data. Este proceso cumplió el objetivo de transformar datos crudos en información útil, validando la eficacia de herramientas gratuitas y conocimientos básicos de programación.

Como recomendación, se propone que otras PyMEs adopten protocolos similares, priorizando la depuración y promoviendo una cultura organizacional basada en datos. Este enfoque no solo optimiza operaciones y puede reducir costos, sino que fortalece la resiliencia competitiva ante entornos cambiantes. Entre las limitaciones identificadas se incluyen la lentitud del desarrollo de scripts escalables y la dependencia de herramientas básicas, adecuadas solo para volúmenes modestos. Se sugiere como línea futura incorporar técnicas de clusterización, explorar plataformas como Weka o KNIME y aplicar modelos predictivos de IA para pronosticar demanda. En síntesis, se confirma que el verdadero valor empresarial reside en la capacidad de convertir los datos disponibles en conocimiento accionable y sostenible.

**BIBLIOGRAFÍA**


Babalghaith, R., & Aljarallah, A. (2024). Factors affecting big data analytics adoption in small and medium enterprises. *Information Systems Frontier, 26(6),* (2165-2187), https://doi.org/10.1007/s10796-024-10538-2.

Cadden, T., Weerawardena, J., Cao, G., Duan, Y., & McIvor, R. (2023). Examining the role of big data and marketing analytics in SMEs innovation and competitive advantage: A knowledge integration perspective. *Journal of Business Research, 168*. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0148296323005842

Capón Albarracín, M. (2025). Development of a business intelligence system for a cafeteria oriented to decision making. *Tesis de maestria en Software con Mención en Desarrollo Web y Movil*, 82. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. Retrieved from https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/30442

Godadaw Ayinaddis, S. (2025). Artificial intelligence adoption dynamics and knowledge in SMEs and large firms: A systematic review and bibliometric analysis. *Journal of Innovation & Knowledge*, 1305-1320.

Jain, S., & Shao, G. (2014). Virtual factory revisited for manufacturing data analytics. *Winter simulation conference (WSC)*, 887-898. doi:10.1109/WSC.2014.7019943

Justy, T., Pellegrin-Boucher, E., Lescop, D., Granata, J., & Gupta, S. (2023). On the edge of big data: Drivers and barriers to data analytics adoption in SMEs. *Technovation*. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016649722300161X

Khan, B., Jan, S., Khan, W., & Chughtai, M. (2024). An overview of ETL techniques, tools, processes and evaluations in data warehousing. *Journal on Big Data*, 1-20.

Llave, M. (2017). A review of business intelligence and analytics in small and medium-sized enterprises. *International Journal of Business Intelligence Research*, 19-41.

Saravanos, A. (2025). *A brief history of the waterfall model: Past, present and future.* Obtenido de arXiv: https://arxiv.org/abs/2510.03894

Schmitz, O. (2023, Mayo 9). *Orange data mining: Aprendizaje automático de código abierto y visualización de datos*. Retrieved from Linkedin: https://www.linkedin.com/pulse/orange-data-mining-aprendizaje-autom%C3%A1tico-de-c%C3%B3digo-y-schmitz-/

Ul Haq, F., Mohd Suki, N., Zaigham, H., Masood, A., & Rajput, A. (2025). Exploring AI adoption and SME performance in resource-constrained environments: A TOE–RBV perspective with mediation and moderation effects. *Journal of Digital Economy*, 5-12.

# CRITERIOS DE UTILIZACIÓN DE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE RIESGOS EN LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA

REY, Eduardo; CORTESE, Sergio; ROMANO, Santiago

*Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional*
erey@frh.utn.edu.ar

**RESUMEN**

Este documento de investigación presenta los criterios para la selección de metodologías de análisis de riesgos en la industria siderúrgica. El estudio se basa en casos reales de empresas del sector en la provincia de Buenos Aires. Se exponen las tres metodologías más utilizadas: HRN (Hazard Rating Number), What If, y la combinación de Bow Tie Analysis + LOPA, aunque se enuncian, también, otras metodologías de uso habitual en análisis de riesgo en los procesos.

La metodología HRN es una herramienta cuantitativa utilizada para evaluar riesgos en maquinaria y líneas de producción. Un total de 1.664 riesgos fueron evaluados en 25 casos, con un HRN inicial promedio de 121 puntos. Con 1.108 recomendaciones, el HRN promedio residual se redujo a 6 puntos, demostrando la eficacia del método.

El método What If es ideal para nuevos procesos o mejoras. En 9 casos, se hicieron 227 propuestas para reducir riesgos, logrando que la mayoría de los casos no tuvieran riesgos residuales intolerables. Este método se basa en la evaluación del impacto de la gravedad y la probabilidad de ocurrencia.

Finalmente, la combinación de Bow Tie Analysis + LOPA se utilizó en 24 casos para un análisis visual y cuantitativo de riesgos. Esta metodología conecta las causas de un evento peligroso con sus consecuencias y evalúa la efectividad de las barreras de protección. Aunque requiere más tiempo (un promedio de 8 meses), logra una reducción en la ocurrencia promedio inicial de 5,15 años a 3,37 años.

**Palabras Claves:** peligro, riesgo, procesos, criterio, metodologías.

**ABSTRACT**

This research paper presents different criteria for selecting risk analysis methodologies in the steel industry. It is based on real-world cases from companies in the Buenos Aires Province. It outlines the three methodologies most used: HRN (Hazard Rating Number), What If, and the combination of Bow Tie Analysis + LOPA. Other often used risk analysis methodologies are also mentioned.

The HRN methodology is a quantitative tool used to evaluate risks in machinery and production lines. A total of 1,664 risks were evaluated across 25 cases. The initial average HRN was 121 points. With 1,108 recommendations, the residual average HRN was reduced to 6 points, demonstrating the method's effectiveness.

The What If method is ideal for new processes or improvements. In 9 cases, 227 proposals were made to reduce risks, leading to a strong reduction in the value of intolerable risks. This method is based on evaluating the impact of severity and the probability of occurrence.

Finally, the Bow Tie Analysis + LOPA combination was used in 24 cases for a visual and quantitative risk analysis. This methodology connects the causes of a hazardous event with its consequences and evaluates the effectiveness of protection barriers. Although it requires more time (an average of 8 months), it achieves a reduction in the average initial occurrence from 5.15 years to 3.37 years.

**Keywords:** hazard, risk, process, criteria, methodology

# 1 INTRODUCCIÓN

La industria siderúrgica es un sector de alto riesgo, alta complejidad, condiciones operativas extremas y una fuerte interdependencia entre sistemas debido a la naturaleza de sus procesos, que involucran temperaturas elevadas, manejo de materiales pesados, sustancias químicas peligrosas y maquinaria compleja. En este contexto, la selección adecuada de metodologías de análisis de riesgos no solo determina la eficacia de las medidas de control, sino que también impacta directamente en la continuidad operativa, la seguridad del personal y la sostenibilidad del negocio.

Este informe describe los criterios para la selección de metodologías de análisis de riesgos, su impacto en las operaciones y una descripción de las más utilizadas en la industria siderúrgica, respaldadas por fuentes técnicas y regulatorias. Además, se expone una síntesis de casos reales que han utilizado algunas de ellas, permitiendo un análisis de indicadores de relevancia para la industria, tales como tiempo o recursos utilizados, y parámetros de eficacia en lo que refiere a la reducción de indicadores de riesgo.

# 2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS

Este capítulo presenta un análisis comparativo de las principales metodologías utilizadas en el tratamiento de riesgos industriales, con especial énfasis en su aplicación dentro del sector siderúrgico.

El objetivo es identificar fortalezas, limitaciones y oportunidades de mejora en cada enfoque, considerando tanto metodologías cualitativas (como HAZOP y What-If) como cuantitativas (LOPA, FMEA, Fault Tree Analysis, Bow Tie). A través de casos prácticos y criterios técnicos, se busca orientar la toma de decisiones en la selección de herramientas que optimicen la gestión de riesgos, minimicen incidentes y fortalezcan la resiliencia operativa.

## 2.1 Sobre la teoría del riesgo

La Norma (ISO 31000, 2018) define “riesgo” como: efecto de la incertidumbre sobre los objetivos, siendo que un efecto es una desviación respecto a lo previsto; puede ser positivo, negativo o ambos, y puede abordar, crear o resultar en oportunidades y amenazas. Y los objetivos pueden tener diferentes aspectos y categorías, y se pueden aplicar a diferentes niveles.

Del mismo modo se define a la “gestión del riesgo” como las actividades coordinadas para dirigir y controlar la organización con relación al riesgo. En lo que respecta a la definición de “fuente de riesgo”: elemento que, por sí solo o en combinación con otros, tiene el potencial de generar daño, consideramos que, para nuestra presentación debemos remitirnos, claramente, a la definición de “peligro” dada en el párrafo anterior.

Siempre en la misma norma, se define al “evento” como toda ocurrencia o cambio de un conjunto particular de circunstancias. Un evento puede tener una o más ocurrencias y puede tener varias causas y varias consecuencias. Un evento también puede ser algo previsto que no llega a ocurrir, o algo no previsto que ocurre. De hecho, un evento puede ser una fuente de riesgo.

Consideramos necesario evocar las definiciones específicas que otorga la norma para “consecuencia” y “control”.

Define, entonces, a “consecuencia” como el resultado de un evento que afecta a los objetivos. Puede ser cierta o incierta y puede tener efectos positivos o negativos, directos o indirectos sobre los objetivos. Se pueden expresar de manera cualitativa o cuantitativa. Cualquier consecuencia puede incrementarse por efectos en cascada y efectos acumulativos.

Finalmente, “control” es la medida que mantiene y/o modifica un riesgo. Los controles incluyen, pero no se limitan a cualquier proceso, política, dispositivo, práctica u otras condiciones y/o acciones que mantengan y/o modifiquen un riesgo y no siempre pueden producir el efecto de modificación previsto o asumido.

Adicionalmente, podríamos también definir riesgo como la probabilidad de que un “peligro” proveniente de una máquina produzca un daño a una persona que tenga algún tipo de interacción con la mencionada maquinaria.

Para la norma ISO 31000, el análisis del riesgo debería considerar factores tales como:

- la probabilidad de los eventos y de las consecuencias;
- la naturaleza y la magnitud de las consecuencias;
- la complejidad y la interconexión;
- los factores relacionados con el tiempo y la volatilidad;
- la eficacia de los controles existentes;
- los niveles de sensibilidad y de confianza.

En términos matemáticos, se expresa al riesgo como el producto algebraico entre un valor que representa la gravedad del daño que potencialmente puede causar un peligro y la probabilidad de que dicho daño ocurra, esto es:

$$R = G \cdot P \tag{1}$$

Siendo:

R: Nivel de riesgo. Puede ser el inicial o el residual

G: Gravedad del daño potencial

P: Probabilidad de ocurrencia del daño

Aunque existen diversas metodologías para la determinación del Nivel de Riesgo, todas poseen un denominador común: determinar de manera objetiva y robusta (o sea, repetitiva para las mismas circunstancias) formas de asignación de valores para cada uno de los términos que lo componen: la Gravedad (G) y la Probabilidad (P).

La clasificación de las acciones que se gestionan para la reducción del nivel de riesgo está asociada al término que intentan reducir:

- Mitigación: son las acciones asociadas a reducir el valor G de gravedad
- Prevención: son las acciones asociadas a reducir el valor P de probabilidad

## 2.2 Clasificación de metodologías más utilizadas

### 2.2.1 Metodologías cualitativas

1. **HAZOP (Hazard and Operability Analysis)**
   - Aplicación: Análisis de desviaciones en procesos químicos y de flujo.
   - Uso en siderurgia: Evaluación de riesgos en plantas de coque y altos hornos.
   - Fuente: "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures" (American Institute of Chemical Engineers, 2008)
2. **What-If / Qué pasa si?**
   - Aplicación: Identificación rápida de escenarios de fallo.
   - Uso en siderurgia: Revisiones de seguridad en sistemas de transporte de chatarra.
   - Fuente: "Risk Assessment and Risk Management" (Center for Chemical Process Safety - CCPS, 2016)

### 2.2.2 Metodologías Cuantitativas

3. **HRN (Hazard Rating Number)**
   - Aplicación: Evaluación de fallos en equipos y líneas de producción críticos
   - Uso en siderurgia: trenes de laminación; máquinas herramientas
   - Fuente: “Risk Estimation: HRN Method” (Steel, 1990)
4. **LOPA (Layer of Protection Analysis)**
   - Aplicación: Determinación de capas de seguridad para evitar accidentes graves.
   - Uso en siderurgia: Sistemas de mitigación en plantas de gas.
   - Fuente: "Layer of Protection Analysis" (American Institute of Chemical Engineers, 2001) y “Human error” (Reason, 1990)

### 2.2.3 Metodologías Híbridas

5. **FTA (Árbol de Fallos) + ETA (Árbol de Eventos)**
   - Aplicación: Modelado probabilístico de accidentes
   - Uso en siderurgia: explosiones en convertidores
   - Fuente: "Fault Tree Handbook" (NASA, 2002)
6. **Bow-Tie Analysis**
   - Aplicación: Visualización de causas y consecuencias de riesgos. Combinación del método FTA + ETA + LOPA para la determinación del modelado probabilístico de reducción de riesgo por medidas de prevención y por medidas de mitigación.
   - Uso en siderurgia: derrames de metal fundido
   - Fuente: "BOW TIES IN RISK MANAGEMENT - A Concept Book for Process Safety" (C. f. C. P. S. o. t. A. I. o. C. E. &. E. Institute, 2018)

## 2.3 Impacto en las operaciones

La aplicación de metodologías de riesgo contribuye a:

- Reducción de accidentes laborales (ej.: quemaduras, exposición a gases)
- Optimización de costos (evitando paradas no planificadas y multas regulatorias)
- Mejora de la confiabilidad de equipos (análisis de fallos en hornos, laminadoras)
- Cumplimiento legal (ej.: normas ISO 31000, Directiva de Seguridad Industrial)

## 3 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE RIESGOS

La elección de una metodología para la industria siderúrgica debe basarse en:

1. **Nivel de detalle y profundidad del análisis requerido**

   Este criterio establece el volumen de datos requeridos para la identificación de un peligro y la medición de su impacto real.

   - **Análisis Cualitativos:** se centran en la identificación de peligros y la clasificación del riesgo basada en escalas subjetivas (Bajo, Medio, Alto). Utilizan matrices de probabilidad vs. consecuencia.
     - **Ventaja:** rápidos, requieren menos datos y recursos, ideales para evaluaciones iniciales o para riesgos bien conocidos.
     - **Metodologías típicas:** listas de verificación (Checklists), HAZID (Hazard Identification), What-If / Análisis de Escenarios.
   - **Análisis Cuantitativos:** buscan evaluar el riesgo numéricamente, asignando valores probabilísticos a la ocurrencia de un evento y a la magnitud de sus consecuencias.
     - **Ventaja:** proporcionan una base objetiva para la toma de decisiones, especialmente crucial para justificar grandes inversiones en seguridad.
     - **Metodologías típicas:** Árboles de Fallos (para calcular probabilidades), Árboles de Eventos (para modelar consecuencias) y Análisis de Consecuencias (modelos de dispersión de gases, explosiones, etc.), AMFE (Análisis de Modos de Fallo y sus Efectos)
   - **Análisis Semi-Cuantitativos:** un híbrido que asigna valores numéricos a categorías cualitativas (ejemplo: "Alto" = 5) para priorizar riesgos de manera más consistente.

2. **Adaptabilidad a procesos siderúrgicos específicos**

   La metodología debe ser lo suficientemente flexible y robusta para capturar los peligros únicos de cada proceso productivo del acero. Algunos procesos típicos de este tipo de industria y sus riesgos asociados son:

   - **Altos Hornos:** riesgos de explosiones por contacto agua-hierro fundido, escapes de monóxido de carbono (CO), proyección de metal fundido, calor radiante intenso. Metodologías como HAZOP son ideales para analizar desviaciones en los parámetros de proceso (flujo, temperatura, presión).
   - **Colada Continua:** atrapamientos, derrames de metal, incendios por fugas de agua de refrigeración, radiación térmica. Un Bow Tie Analysis es útil para tareas específicas de esta área.
   - **Laminación en Caliente:** riesgos de atrapamiento en cilindros, contacto con superficies a alta temperatura, golpes o cortes por rebabas de acero, ruido extremo. Un HRN para las interacciones entre los equipos mecánicos y los operarios es el mejor método para estos tipos de procesos.

3. **Fase del Proceso (Ciclo de Vida del Activo)**

   El momento en el que se aplica el análisis determina el enfoque más adecuado.

   - **Diseño (Fase de Ingeniería**): se prefieren metodologías proactivas y conceptuales como HAZOP y What If para "diseñar la seguridad" desde el inicio e integrar barreras de protección inherentes.
   - **Operación:** se usan herramientas de monitorización continua y análisis de rutina: inspecciones de seguridad, observaciones de comportamiento, análisis de incidentes. También aplican Bow Tie y What-If para cambios operativos menores o tratamiento de incidentes

- **Mantenimiento:** es crítico el Análisis de Riesgos del Trabajo (ART) o Permisos de Trabajo para tareas no rutinarias como trabajos en caliente, espacios confinados o bloqueos de energía (LOTO).

**4. Complejidad Técnica**

La metodología debe ser capaz de desentrañar las interacciones entre diferentes tipos de riesgos.

- **Riesgos Mecánicos/Cinemáticos:** metodologías como HRN y Bow Tie son excelentes para analizar fallos de componentes o accesos sin control a zonas con mecanismos peligrosos.
- **Riesgos Químicos/Térmicos:** para evaluar fugas, dispersiones, incendios y explosiones, se requieren técnicas cuantitativas o semi-cuantitativas como HRN o LOPA.
- **Riesgos Eléctricos:** análisis de arco eléctrico, cortocircuitos. Árboles de Fallos son útiles para calcular la probabilidad de un fallo eléctrico crítico.
- **Factores Humanos y Ergonomía:** errores operativos, diseño de puestos de trabajo. Técnicas como SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach) o Análisis Cognitivo de Tareas se integran aquí.
- **Capacidad de Integración:** la mejor metodología es aquella que puede crear un modelo holístico, por ejemplo, usando el Bow Tie para modelar cómo un error humano (factor humano) puede llevar a una fuga química (riesgo químico) que cause una explosión (riesgo térmico/mecánico).

**5. Requerimientos y Compatibilidad con Normativas Internacionales**

La metodología seleccionada debe generar evidencia auditable que demuestre el cumplimiento legal y normativo.

- **OSHA (EE.UU.) / Ley 19.587:** exigen la evaluación de riesgos pero no prescriben una metodología específica. Cualquier herramienta sistemática es válida.
- **ISO 31000 (Gestión del Riesgo):** proporciona un marco general. Metodologías como HRN o Bow Tie se alinean perfectamente con su enfoque basado en el análisis de la probabilidad y el impacto.
- **ISO 45001 (Sistemas de Gestión de SST):** requiere la identificación de peligros y la evaluación de riesgos. Cualquier metodología lista (What If, HAZOP, Checklists) sirve para cumplir este requisito.
- **IEC 61511 (Seguridad Funcional):** requiere específicamente el uso de HAZOP y LOPA para identificar escenarios de riesgo peligrosos y determinar el nivel de integridad de seguridad (SIL) requerido para las barreras de protección.
- **NFPA / ATEX (Protección contra Explosiones):** guían hacia análisis que identifiquen atmósferas explosivas y fuentes de ignición, donde HAZOP y What-If son extremadamente útiles.

**6. Recursos Disponibles**

El análisis debe ser proporcional a la capacidad de la organización para ejecutarlo.

- **Tiempo:** un HAZOP de una unidad completa puede llevar semanas, mientras que un What-If simplificado puede hacerse en un día.
- **Personal Capacitado:** algunas técnicas (ejemplo: HAZOP, What If, Bow Tie) requieren facilitadores expertos y equipos multidisciplinarios. Otras (Checklists) pueden ser aplicadas por personal con menos formación específica. La aplicación de HRN exige expertos profesionales.
- **Herramientas de Software:** los análisis cuantitativos complejos (HRN, LOPA) requieren software especializado. Las cualitativas se pueden gestionar con bases de datos o software de gestión de HAZOP o What If.

### 7. Facilidad de Implementación y Comprensión por Equipos Multidisciplinarios

La efectividad final de un análisis de riesgos depende de que sus hallazgos sean entendidos y aceptados por todos.

- **Inversiones:** una metodología muy compleja puede generar resultados que la gerencia no entienda, dificultando la aprobación de fondos para las medidas correctivas. Los resultados deben ser claros y convincentes.
- **Aprovechamiento del Conocimiento Multinivel:** la metodología debe estructurar las sesiones de tal forma que el operario con 20 años de experiencia y el ingeniero de diseño puedan contribuir en igual medida. HAZOP y What-If son excelentes para esto.
- **Plazos de Ejecución:** una técnica que se alarga demasiado puede perder el compromiso del equipo y quedar desactualizada respecto a la operación real. La metodología debe ser ágil y enfocada.

## 4 ESTUDIO DE CASOS

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se contó con el aporte de la Empresa AVEC ING S.A.S la cual ha llevado a cabo análisis de riesgo en diversas plantas siderúrgicas aplicando algunas de las metodologías enunciadas precedentemente.

Por razones de confidencialidad no se puede comunicar el nombre de las empresas que fueron objeto de las evaluaciones de riesgo. Asimismo, se mencionan los procesos, líneas de producción o máquinas que formaron parte de los análisis, con sus denominaciones alteradas para respetar los acuerdos establecidos entre las Empresas.

Los 3 métodos utilizados fueron:

- HRN (Hazard Rating Number)
- What If / Qué pasa sí?
- Bow Tie Analysis + LOPA

### 4.1 HRN (Hazard Rating Number)

Fue utilizado en el análisis de máquinas y líneas de producción.

El método se basa en la evaluación y análisis de los riesgos de los distintos peligros que se presentan como energías que actúan en la maquinaria involucrada tales como: mecánica, eléctrica, térmica, de presión, de radiación, etc. calculando para cada riesgo identificado el índice HRN:

$$HRN = DPH \cdot LO \cdot FE \cdot NP \tag{2}$$

Donde los valores respectivos asignables se definen en las siguientes tablas:

*Tabla 1: DPH – Daño por el riesgo*

| DPH | daño por el riesgo |
|---|---|
| 0,1 | Rasguño / Moretón |
| 0,5 | Quemadura / Corte / Enfermedad corto plazo |
| 1 | Rotura menor de hueso de dedo, mano o pie |
| 2 | Rotura mayor de hueso de dedo, mano o pie |
| 4 | Pérdida de 1 o 2 dedos |
| 8 | Amputación pierna / mano. Pérdida auditiva o visual parcial |
| 15 | Muerte |

*Tabla 2: LO - Probabilidad de ocurrencia*

| LO | probabilidad de ocurrencia |
|---|---|
| 0,03 | Imposible. No puede pasar bajo ninguna circunstancia |
| 0,1 | Casi improbable. Sólo es posible bajo circunstancias extremas. |
| 0,5 | Es muy improbable. Aunque concebible |
| 1 | Improbable. Pero podría ocurrir |
| 2 | Posible. Pero inusual |
| 5 | Hay posibilidades. Puede pasar |
| 8 | Probable. No sorpresivo |
| 10 | Probablemente. Se puede esperar que ocurra |
| 15 | Cierto. Indudable |

*Tabla 3: FE - Frecuencia de exposición al riesgo*

| FE | frecuencia de exposición |
|---|---|
| 0,1 | Infrecuentemente |
| 0,2 | Anualmente |
| 1 | Mensualmente |
| 1,5 | Semanalmente |
| 2,5 | Diario |
| 4 | Por hora |
| 5 | En cada ciclo. Constante |

*Tabla 4: NP - Número de personas en peligro*

| NP | personas en peligro |
|---|---|
| 1 | de 1 a 2 |
| 2 | de 3 a 7 |
| 4 | de 8 a 15 |
| 8 | de 16 a 50 |
| 12 | más de 50 |

En función de los valores obtenidos por el cálculo HRN, se clasifican los riesgos según la siguiente escala y sus acciones esperadas:

*Tabla 5: HRN - criterios de acciones a implementar*

| HRN | | Riesgo | Plan de acción requerido |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | Despreciable | No es necesario la implementación de medidas de reducción de riesgo adicionales |
| 1,01 | 5 | Muy Bajo | No es necesario la implementación de medidas de reducción de riesgo adicionales |
| 5,01 | 10 | Bajo | Tolerables y pueden ser controlados con procedimientos |
| 10,01 | 50 | Significante | Implementar acciones de reducción de riesgo en menos de 12 meses |
| 50,01 | 100 | Alto | Implementar acciones de reducción de riesgo en menos de 3 meses |
| 100,01 | 500 | Muy Alto | Implementar acciones de reducción de riesgo en menos de 1 mes |
| 500,01 | 1000 | Extremo | Implementar acciones de reducción de riesgo de manera inmediata |
| 1000,01 | 13500 | Inaceptable | Parar la actividad e implementar acciones de reducción de riesgo de manera inmediata |

### 4.1.1 Presentación de casos

*Tabla 6: HRN – Casos de Estudio*

| # | Fecha | Proyecto | Total Riesgos Evaluados | HRN Prom. Inicial | Total de acciones recomendadas | HRN Prom. Residual | Despreciable | | Muy Bajo | | Bajo | | Significante | | Alto | | Muy Alto | | Extremo | | Inaceptable | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Inic. | Res. | Inic. | Res. | Inic. | Res. | Inic. | Res. | Inic. | Res. | Inic. | Res. | Inic. | Res. | Inic. | Res. |
| 1 | 30/07/2021 | LÍNEA OTO MILLS 1 | 161 | 84 | 95 | 7 | 0 | 0 | 9 | 21 | 3 | 7 | 15 | 4 | 3 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 19/08/2021 | CONFORMADORA DE TUBOS | 152 | 79 | 106 | 15 | 0 | 1 | 26 | 36 | 7 | 26 | 14 | 12 | 9 | 1 | 19 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 29/03/2022 | ACCESO A LÍNEA CONFORMADORA DE TUBOS S | 34 | 178 | 38 | 4 | 0 | 0 | 0 | 32 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 15/04/2022 | RECTIFICADORA DE CILINDROS DE LAMINACIÓN | 35 | 198 | 24 | 9 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 3 | 2 | 2 | 4 | 0 | 4 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 26/08/2022 | TIJERA DE RECORTES LATERALES | 59 | 92 | 64 | 5 | 1 | 1 | 2 | 34 | 1 | 13 | 22 | 1 | 12 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 31/03/2023 | DECAPADO - LAMINACIÓN EN FRÍO | 95 | 141 | 63 | 4 | 24 | 41 | 7 | 32 | 4 | 22 | 15 | 0 | 12 | 0 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 11/04/2023 | INSPECCIÓN FINAL DE CHAPA | 33 | 143 | 25 | 4 | 10 | 18 | 1 | 10 | 2 | 6 | 4 | 1 | 6 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 22/04/2023 | APLANADO DE CHAPA | 90 | 129 | 79 | 3 | 9 | 20 | 6 | 54 | 4 | 16 | 11 | 0 | 23 | 0 | 37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 08/05/2023 | LÍNEA DE TEMPLADO | 51 | 139 | 32 | 5 | 13 | 21 | 3 | 13 | 2 | 17 | 11 | 0 | 9 | 0 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 24/05/2023 | ESTAÑADO | 172 | 102 | 120 | 3 | 6 | 24 | 31 | 115 | 24 | 33 | 23 | 0 | 35 | 0 | 53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 15/08/2023 | LÍNEA DE LIMPIEZA POR ELECTROLISIS | 68 | 144 | 38 | 4 | 14 | 19 | 1 | 39 | 1 | 9 | 8 | 1 | 15 | 0 | 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 25/09/2023 | LÍNEA DE LAMINADO FINAL | 51 | 119 | 37 | 3 | 11 | 18 | 7 | 28 | 2 | 5 | 7 | 0 | 12 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 05/10/2023 | LAMINADO EN FRÍO | 65 | 114 | 24 | 6 | 17 | 23 | 7 | 16 | 14 | 24 | 0 | 2 | 8 | 0 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 23/01/2024 | RECOCIDO | 82 | 228 | 44 | 14 | 18 | 39 | 4 | 17 | 1 | 12 | 11 | 21 | 8 | 0 | 47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 27/04/2024 | TANDEM | 79 | 80 | 35 | 8 | 15 | 22 | 11 | 22 | 16 | 29 | 6 | 6 | 15 | 0 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 29/04/2024 | LÍNEA DE APLANADO BAJO TENSIÓN | 41 | 160 | 22 | 4 | 7 | 15 | 2 | 22 | 2 | 5 | 13 | 1 | 0 | 0 | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 03/05/2024 | LÍNEA DE CORTE PARA BLANKS ESPECIALES | 39 | 76 | 26 | 6 | 4 | 7 | 4 | 28 | 0 | 1 | 18 | 3 | 10 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 09/05/2024 | LINEA DE CORTE LONGITUDINAL | 32 | 141 | 21 | 5 | 4 | 9 | 5 | 17 | 0 | 7 | 5 | 0 | 8 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 20/05/2024 | LÍNEA DE CORTE PARA FLEJES ESPECIALES | 49 | 80 | 32 | 5 | 9 | 14 | 6 | 26 | 1 | 7 | 16 | 3 | 6 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 22/05/2024 | LÍNEA CORTE TRANSVERSAL TIPO LIGG | 47 | 41 | 31 | 6 | 9 | 12 | 7 | 31 | 1 | 1 | 19 | 3 | 10 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 22/05/2024 | LÍNEA DE CORTE PARA BLANKS | 48 | 63 | 30 | 7 | 10 | 13 | 3 | 31 | 0 | 0 | 16 | 4 | 15 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 27/05/2024 | CONFORMADORA DE TUBOS | 51 | 132 | 41 | 4 | 5 | 11 | 2 | 33 | 1 | 7 | 11 | 1 | 15 | 0 | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | 27/05/2024 | LÍNEA ACANALADORA DE CHAPAS | 51 | 94 | 37 | 5 | 8 | 14 | 4 | 26 | 1 | 10 | 16 | 2 | 9 | 0 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 05/06/2024 | LÍNEA DE CORTE DE FLEJES | 50 | 91 | 28 | 5 | 9 | 15 | 3 | 24 | 1 | 10 | 12 | 2 | 12 | 0 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 22/04/2025 | LÍNEA TEMPER | 29 | 186 | 16 | 3 | 9 | 18 | 2 | 4 | 1 | 8 | 4 | 0 | 1 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

### 4.1.2 Análisis de resultados obtenidos

Los 25 casos presentados, provenientes de 2 empresas siderúrgicas diferentes del mismo sector geográfico de la Provincia de Buenos Aires, generaron 1.664 riesgos evaluados en las distintas familias de análisis de peligros.

El HRN promedio inicial de todos los casos evaluados fue de 121 puntos.

Para bajar dicho valor, se enunciaron 1.108 recomendaciones.

Aplicadas las mismas, se lograría posicionar el HRN promedio residual en un muy aceptable valor de 6 puntos.

Esto, sumado al hecho de que no existan riesgos residuales Muy Altos, Extremos o Inaceptables y, solo 1 Alto, demuestra la eficacia de la metodología HRN para el análisis de líneas.

## 4.2 What If / Qué pasa sí?

El método fue utilizado para casos de nuevos procesos a implementar o mejoras en procesos existentes.

Se basa en la evaluación del impacto en la gravedad y la estimación de la probabilidad de ocurrencia según una matriz de riesgo de 5 niveles (PEMEX, 2019) para cada uno de los potenciales riesgos asociados a los peligros que se plantean según la información procedente de un análisis HAZOP o del uso de la consulta a expertos en cada una de las áreas involucradas con el desarrollo de la metodología.

*Tabla 7: matriz de riesgo*

| Probabilidad (P) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 5 | III-5 | II-10 | II-15 | I-20 | I-25 |
| | 4 | IV-4 | III-8 | II-12 | I-16 | I-20 |
| | 3 | IV-3 | III-6 | II-9 | II-12 | II-15 |
| | 2 | IV-2 | IV-4 | III-6 | III-8 | II-10 |
| | 1 | IV-1 | IV-2 | IV-3 | IV-4 | III-5 |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | Consecuencia (G) | | | | |

El riesgo se cuantifica como el producto entre el valor de gravedad (G) del peligro y la probabilidad (P) de ocurrencia de ese peligro (G.P)

### 4.2.1 Presentación de casos

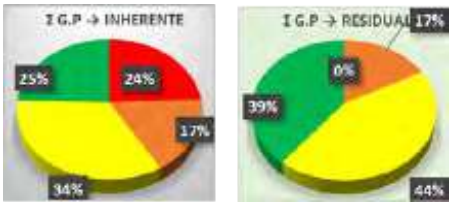
*Tabla 8: What If - Casos de Estudio*

| # | Proyecto | Fecha Inicio | Fecha Fin | Participantes | Sesiones |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Recolección, traslado y volcado de escoria | 10/05/2022 | 16/12/2022 | 16 | 10 |

**RESÚMEN EJECUTIVO**

| CRITICIDAD | INHERENTE Q | INHERENTE Σ G.P | INHERENTE % | RESIDUAL Q | RESIDUAL Σ G.P | RESIDUAL % | TENDENCIA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| INTOLERABLE | 4 | 64 | 11% | 0 | 0 | 0% | 11% |
| INDESEABLE | 4 | 46 | 11% | 3 | 33 | 8% | 2% |
| ALARP | 12 | 90 | 32% | 12 | 84 | 33% | 2% |
| TOLERABLE | 18 | 65 | 47% | 21 | 76 | 58% | 11% |

CANTIDAD DE ACCIONES PROPUESTAS: 21

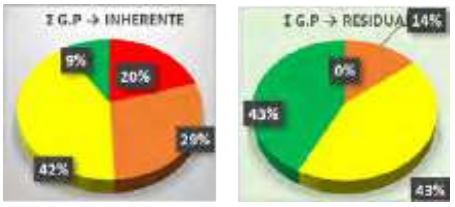



| 2 | Movimiento de bobinas en depósito | 14/06/2022 | 26/09/2022 | 12 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|

**RESÚMEN EJECUTIVO**

| CRITICIDAD | INHERENTE Q | INHERENTE Σ G.P | INHERENTE % | RESIDUAL Q | RESIDUAL Σ G.P | RESIDUAL % | TENDENCIA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| INTOLERABLE | 5 | 80 | 11% | 0 | 0 | 0% | 11% |
| INDESEABLE | 10 | 114 | 22% | 3 | 33 | 7% | 16% |
| ALARP | 21 | 164 | 47% | 14 | 100 | 31% | -16% |
| TOLERABLE | 9 | 36 | 20% | 28 | 98 | 62% | 42% |

CANTIDAD DE ACCIONES PROPUESTAS: 23

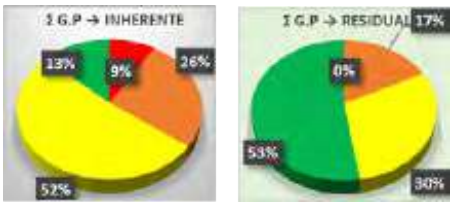



| 3 | Sistema anticolisión de grúas puente | 12/07/2022 | 27/10/2022 | 7 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|

**RESÚMEN EJECUTIVO**

| CRITICIDAD | INHERENTE Q | INHERENTE Σ G.P | INHERENTE % | RESIDUAL Q | RESIDUAL Σ G.P | RESIDUAL % | TENDENCIA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| INTOLERABLE | 1 | 16 | 4% | 0 | 0 | 0% | 4% |
| INDESEABLE | 4 | 48 | 17% | 2 | 21 | 9% | 9% |
| ALARP | 12 | 94 | 52% | 5 | 36 | 22% | -30% |
| TOLERABLE | 6 | 24 | 26% | 16 | 63 | 70% | 43% |

CANTIDAD DE ACCIONES PROPUESTAS: 11

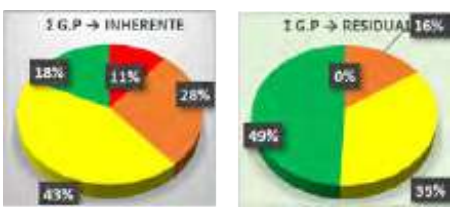



| 4 | Proceso de secado y conservación de potes | 16/08/2022 | 29/12/2022 | 14 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|

**RESÚMEN EJECUTIVO**

| CRITICIDAD | INHERENTE Q | INHERENTE Σ G.P | INHERENTE % | RESIDUAL Q | RESIDUAL Σ G.P | RESIDUAL % | TENDENCIA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| INTOLERABLE | 3 | 48 | 5% | 0 | 0 | 0% | 5% |
| INDESEABLE | 12 | 120 | 18% | 4 | 45 | 6% | 12% |
| ALARP | 28 | 188 | 42% | 16 | 102 | 25% | -17% |
| TOLERABLE | 23 | 78 | 35% | 44 | 143 | 69% | 34% |

CANTIDAD DE ACCIONES PROPUESTAS: 44



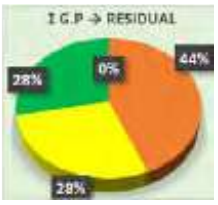
| # | Proyecto | Fecha Inicio | Fecha Fin | Participantes | Sesiones |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | Mezclador de minerales | 01/09/2022 | 07/12/2022 | 19 | 10 |

**RESÚMEN EJECUTIVO**

| CRITICIDAD | INHERENTE Q | INHERENTE Σ G.P | INHERENTE % | RESIDUAL Q | RESIDUAL Σ G.P | RESIDUAL % | TENDENCIA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| INTOLERABLE | 6 | 96 | 18% | 0 | 0 | 0% | ↑ 18% |
| INDESEABLE | 13 | 159 | 38% | 8 | 87 | 24% | ↑ 14% |
| ALARP | 10 | 70 | 29% | 8 | 56 | 24% | ↓ -5% |
| TOLERABLE | 5 | 16 | 15% | 17 | 56 | 52% | ↑ 37% |

| CANTIDAD DE ACCIONES PROPUESTAS |
|---|
| 37 |




| 6 | Calderas | 17/09/2022 | 15/11/2022 | 7 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|

**RESÚMEN EJECUTIVO**

| CRITICIDAD | INHERENTE Q | INHERENTE Σ G.P | INHERENTE % | RESIDUAL Q | RESIDUAL Σ G.P | RESIDUAL % | TENDENCIA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| INTOLERABLE | 29 | 560 | 41% | 16 | 308 | 23% | ↑ 18% |
| INDESEABLE | 12 | 134 | 17% | 20 | 215 | 28% | ↓ -11% |
| ALARP | 26 | 194 | 37% | 23 | 167 | 32% | ↓ -4% |
| TOLERABLE | 4 | 16 | 6% | 12 | 45 | 17% | ↑ 11% |

| CANTIDAD DE ACCIONES PROPUESTAS |
|---|
| 39 |







| 7 | Suministro de gas de Alto Horno | 15/09/2022 | 03/01/2023 | 9 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|

**RESÚMEN EJECUTIVO**

| CRITICIDAD | INHERENTE Q | INHERENTE Σ G.P | INHERENTE % | RESIDUAL Q | RESIDUAL Σ G.P | RESIDUAL % | TENDENCIA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| INTOLERABLE | 1 | 20 | 6% | 0 | 0 | 0% | ↑ 6% |
| INDESEABLE | 3 | 34 | 18% | 3 | 37 | 18% | → 0% |
| ALARP | 10 | 74 | 59% | 8 | 58 | 47% | ↓ -12% |
| TOLERABLE | 3 | 10 | 18% | 6 | 21 | 35% | ↑ 18% |

| CANTIDAD DE ACCIONES PROPUESTAS |
|---|
| 10 |







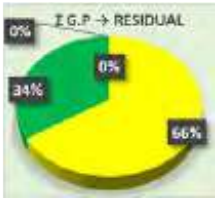
| 8 | Zunchado y etiquetado automático | 10/04/2023 | 30/05/2023 | 17 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|

**RESÚMEN EJECUTIVO**

| CRITICIDAD | INHERENTE Q | INHERENTE Σ G.P | INHERENTE % | RESIDUAL Q | RESIDUAL Σ G.P | RESIDUAL % | TENDENCIA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| INTOLERABLE | 0 | 0 | 0% | 0 | 0 | 0% | → 0% |
| INDESEABLE | 0 | 0 | 0% | 0 | 0 | 0% | → 0% |
| ALARP | 16 | 88 | 73% | 13 | 68 | 59% | ↓ -14% |
| TOLERABLE | 6 | 24 | 27% | 9 | 35 | 41% | ↑ 14% |

| CANTIDAD DE ACCIONES PROPUESTAS |
|---|
| 18 |




| 9 | Generación de H2 | 11/09/2024 | 05/11/2024 | 7 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|

**RESÚMEN EJECUTIVO**

| CRITICIDAD | INHERENTE Q | INHERENTE Σ G.P | INHERENTE % | RESIDUAL Q | RESIDUAL Σ G.P | RESIDUAL % | TENDENCIA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| INTOLERABLE | 4 | 68 | 13% | 0 | 0 | 0% | ↑ 13% |
| INDESEABLE | 9 | 98 | 29% | 3 | 36 | 10% | ↑ 19% |
| ALARP | 11 | 82 | 35% | 10 | 73 | 32% | ↓ -3% |
| TOLERABLE | 7 | 21 | 23% | 18 | 62 | 58% | ↑ 35% |

| CANTIDAD DE ACCIONES PROPUESTAS |
|---|
| 24 |







### 4.2.2 Análisis de resultados obtenidos

Los datos recopilados de los 9 casos analizados arrojan un total de 227 propuestas de implementación para lograr que, salvo el caso #6 “Calderas” ningún otro caso evaluado posea riesgos residuales “Intolerables”; incluso en ese caso, se verifica una fuerte reducción del valor G.P de 560 a 308 representando casi un 50% menos de riesgos intolerables.

El desarrollo de los What If fueron llevados a cabo en un promedio de 7,33 reuniones cada uno y con la participación, también promedio, de 12 personas de todas las empresas involucradas.

El método What If representó una buena elección para el análisis de nuevos procesos a implementar en Planta.

### 4.3 Bow Tie Analysis + LOPA

Fueron realizados 24 análisis Bow Tie + LOPA en diferentes áreas productivas de las empresas seleccionadas para la muestra de este informe.

El uso combinado de las metodologías Bow Tie y LOPA en la industria siderúrgica permite un análisis de riesgos robusto y completo, abordando tanto la prevención como la mitigación de eventos peligrosos.

Ofrece una visión integral de la gestión de riesgos en los procesos siderúrgicos. El Bow Tie provee una representación visual del riesgo, conectando las causas de un evento peligroso con sus consecuencias, mientras que el LOPA cuantifica la efectividad de las barreras de protección.

- **Bow Tie (Lazo de corbata):**
  - **Identificación del escenario de riesgo:** se comienza identificando un peligro en el proceso analizando y un evento de riesgo central, o denominado evento tope (Top Event), que representa una situación fuera de control del peligro asociado. Por ejemplo: al siguiente peligro: “combustible almacenado en tanque T453” se le podría asociar el evento no deseado: “desbordamiento del tanque T453 y derrame de combustible en el piso”.
  - **Causas y barreras preventivas (lado izquierdo):** se determinan las amenazas o causas que pueden llevar al evento. Por ejemplo, en el caso de una explosión, la causa podría ser una acumulación de gas. Se visualizan las barreras preventivas (controles) que se implementan para evitar que la causa genere el evento, como sensores de nivel de gas o procedimientos de mantenimiento.
  - **Consecuencias y barreras de mitigación (lado derecho):** se identifican las consecuencias potenciales del evento, como daños a la propiedad, lesiones o fatalidades. Se representan las barreras de mitigación que reducen el impacto de estas consecuencias, como sistemas de extinción de incendios o planes de evacuación.
- **LOPA (Análisis de capas de protección):**
  - **Cuantificación de las barreras:** una vez que el Bow Tie ha identificado las barreras, la metodología LOPA entra en juego para evaluarlas de manera cuantitativa. Se enfoca en las capas de protección independientes (IPL, Independent Protection Layers) que son cruciales para prevenir el evento.
  - **Determinación de la probabilidad:** se calcula la probabilidad de que cada IPL falle al momento de ser requerida. Esto se hace asignando un factor de reducción de riesgo (RRF – Risk Reduction Factor) o una probabilidad de falla en demanda (PFD, Probability of Failure on Demand) a cada barrera.
  - **Análisis del riesgo residual:** al multiplicar la frecuencia del evento no mitigado por las PFD de cada IPL, se obtiene la frecuencia de riesgo residual. Este valor se compara con los criterios de riesgo tolerables de la empresa para determinar si el nivel de riesgo es aceptable. Este valor surge de la Matriz de Riesgo (ver Tabla 7)

### 4.3.1 Presentación de casos

*Tabla 9: Bow Tie – Casos de Estudio*

| # | Proyecto | Fecha Inicio | Fecha Fin | Participantes | Sesiones | ESCENARIO | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | # | PELIGRO | EVENTO TOPE | Amenazas | Ocurr. Anual Inicial | Barreras Preventivas | Ocurr. Anual Residual | Consecuencias | Gravedad Inicial | Barreras de Mitigación | Gravedad Residual |
| 1 | COQUERÍA | 29/02/2024 | 13/12/2024 | 9 | 23 | 1 | Gases combustibles en sistema de combustión de baterías | Formación de mezcla explosiva en sistema de combustión | 8 | 6,00E-01 | 16 | 1,52E-01 | 2 | 5 | 1 | 4 |
| | | | | | | 2 | Gases combustibles en sistema de combustión de baterías | Acumulación de agua, condensado y residuos sólidos con potencial colapso en tuberías de alimentación de gases combustibles | 3 | 2,16E-01 | 6 | 1,26E-02 | 3 | 5 | 0 | 5 |
| | | | | | | 3 | Gases combustibles en sistema de combustión de baterías | Fuga de gases combustibles en tuberías de alimentación | 7 | 1,10E+00 | 9 | 1,06E+00 | 3 | 5 | 7 | 4 |
| | | | | | | 4 | Gas combustible crudo caliente en sistema de captación de baterías | Perdida de contención de gas combustible crudo desde la batería a la reguladora de presión del colector | 9 | 1,85E+00 | 24 | 1,03E+00 | 4 | 5 | 9 | 4 |
| | | | | | | 5 | Gas combustible crudo caliente en sistema de captación de baterías | Perdida de contención de gas combustible crudo en el colector | 3 | 1,20E+00 | 10 | 1,09E-01 | 3 | 5 | 3 | 4 |
| | | | | | | 6 | Gas combustible crudo en sistema de captación de baterías hasta la reguladora | Formación de mezcla explosiva en colector | 3 | 2,00E-01 | 10 | 1,10E-01 | 2 | 5 | 2 | 4 |
| | | | | | | 7 | Gas sin combustionar en el sistema de humos de Baterías | Mezcla explosiva por acumulacion de gas en la chimenea | 2 | 2,00E-01 | 5 | 2,20E-02 | 1 | 5 | 0 | 5 |
| 2 | CUCHARAS DE ACERO | 01/03/2024 | 03/04/2025 | 14 | 16 | 8 | Arrabio/acero en la cuchara de acero | Reacción descontrolada entre agua de refrigeración y arrabio/acero en la cuchara de acero durante el soplo | 5 | 3,50E+00 | 27 | 2,19E-02 | 1 | 5 | 3 | 4 |
| | | | | | | 9 | Arrabio/acero en la cuchara de acero | Formación de mezcla explosiva en sistema de aspiración | 5 | 1,42E+01 | 12 | 1,20E+00 | 1 | 5 | 3 | 4 |
| 3 | HORNOS DE LAMINACIÓN | 09/04/2024 | 31/01/2025 | 12 | 16 | 10 | Gas mezcla en la cámara de combustión con tunel a alta temperatura | Combustión no controlada en interior del tunel de calentamiento | 5 | 2,30E+00 | 19 | 2,01E-01 | 2 | 5 | 3 | 4 |
| | | | | | | 11 | Gas mezcla en la cámara de combustión con tunel a alta temperatura | Pérdida de contención de gas combustible | 5 | 3,20E+00 | 5 | 3,11E+00 | 1 | 5 | 2 | 4 |
| | | | | | | 12 | Residuales del gas combustible en sistema de combustión del tunel de calentamiento | Acumulación excesiva de residuales del gas combustible en cañerías del tunel de calentamiento | 4 | 1,41E+01 | 2 | 1,34E+01 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| | | | | | | 13 | Gas combustible en la cámara de combustión del tunel de calentamiento a temperatura de encendido | Combustión no controlada en interior del tunel de calentamiento | 9 | 9,00E+00 | 22 | 6,11E+00 | 1 | 5 | 2 | 4 |
| 4 | PRODUCTOS DERIVADOS | 07/10/2024 | 26/05/2025 | 13 | 18 | 14 | Gas combustible en Electrofiltro | Formación de mezcla explosiva en Electrofiltro | 7 | 2,45E+00 | 7 | 1,41E+00 | 3 | 5 | 3 | 4 |
| | | | | | | 15 | Presencia de productos de combustión en horno | Fuga de gases combustible | 6 | 5,00E-01 | 7 | 3,50E-01 | 3 | 5 | 6 | 4 |
| | | | | | | 16 | Presencia de hidrocarburos en tanques, cañerías, equipo de planta | Pérdida de contención de hidrocarburos | 8 | 4,20E+00 | 8 | 2,40E+00 | 3 | 5 | 0 | 5 |
| | | | | | | 17 | Presencia de vapores ácidos ricos en NH3, H2S y HCN | Pérdida de contención vapores ácidos | 6 | 3,20E+00 | 11 | 1,24E+00 | 2 | 5 | 2 | 5 |
| | | | | | | 18 | Hidrocarburos en tanque/columnas, cañerías, equipo de planta | Pérdida de contención de hidrocarburos | 6 | 3,20E+00 | 7 | 1,40E+00 | 3 | 5 | 0 | 5 |
| 5 | EQUIPO DE PRECALENTAMIENTO | 13/11/2024 | 19/08/2025 | 13 | 9 | 19 | Gas combustible en sistema de combustión | Formación de mezcla explosiva con presencia de fuente de ignición (temperatura) | 7 | 6,30E+00 | 25 | 1,44E+00 | 2 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | 20 | Carcaza de equipo de calentamiento sometido a alta temperatura y presión | Pérdida de elementos de aislación | 7 | 2,30E+00 | 13 | 1,36E+00 | 3 | 5 | 2 | 5 |
| 6 | COLADA | 15/01/2025 | 17/07/2025 | 10 | 9 | 21 | Recepción de cuchara con acero líquido | Derrame / rebalse de acero/escoria | 10 | 7,30E+00 | 25 | 4,21E+00 | 2 | 5 | 8 | 4 |
| | | | | | | 22 | Acero líquido colando | Derrame / rebalse de acero/escoria | 8 | 7,10E+00 | 20 | 4,31E+00 | 2 | 5 | 8 | 4 |
| 7 | GALVANIZADO | 14/04/2025 | 20/05/2025 | 12 | 3 | 23 | Suministro del gas natural + aire en encendido de horno | Acumulación de gas en zonas de llama directa | 6 | 6,00E+00 | 14 | 5,02E+00 | 2 | 5 | 1 | 5 |
| 8 | ELECTRO DEPOSICIÓN | 10/01/2025 | 25/07/2025 | 12 | 7 | 24 | Presencia de material inflamable en las cañerías (polipropileno) | Aparición de fuentes de ignición durante la operación | 10 | 1,30E+00 | 12 | 1,23E+00 | 4 | 5 | 4 | 4 |

### 4.3.2 Análisis de resultados obtenidos

Se relevaron 24 casos combinados Bow Tie + LOPA. En promedio, se realizaron 13 sesiones, con 12 participantes en cada una. Finalmente, a modo de síntesis los resultados observados:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| # Amenazas | 94 | | 35 | # Consecuencias |
| Prom. Ocurrencia Inicial [año] | 5,15 | # Eventos Tope | 5 | Prom. Gravedad Inicial |
| # Barreras Preventivas | 173 | 24 | 45 | # Barreras de Mitigación |
| Prom. Ocurrencia Residual [año] | 3,37 | | 4,3 | Prom. Gravedad Residual |

Se debe señalar, sin embargo, que la realización de estas actividades ha requerido un plazo promedio de 8 meses, lo que resultaría en un valor muy alto comparado con otras industrias, donde se verifican valores de 3 meses en promedio.

## 5 CONCLUSIONES

El análisis exhaustivo de tres de las metodologías de gestión de riesgos – HRN (Hazard Rating Number), What If, y la combinación de Bow Tie Analysis + LOPA – , en 25 casos de estudio de empresas siderúrgicas en la Provincia de Buenos Aires, demuestra su eficacia para mejorar la seguridad operativa y reducir los riesgos inherentes al sector. La selección adecuada de la metodología debe basarse en el nivel de detalle requerido, la fase del ciclo de vida del proceso y los recursos disponibles.

Cada metodología analizada en este informe ofrece beneficios únicos y debe seleccionarse en función de las necesidades específicas del proyecto.

Para el análisis de maquinaria y líneas de producción, HRN es una solución probada y eficaz, de acuerdo a los resultados presentados.

Para la evaluación de nuevos procesos, la metodología What If es ideal para una identificación rápida y colaborativa de los riesgos, resultando en una reducción de sus valores de riesgo medidos con el indicador G.P

Para una gestión de riesgos completa, que visualice y cuantifique tanto la prevención como la mitigación, la combinación de Bow Tie y LOPA ofrece una visión integral, aunque requiere una inversión de tiempo considerable, según los resultados que se evidenciaron en los casos analizados.

En conjunto, la aplicación de estas metodologías se traduce en una reducción significativa de accidentes, la optimización de costos operativos y una mayor confiabilidad de los equipos, cumpliendo con las normativas internacionales de seguridad industrial.

## 6 REFERENCIAS


American Institute of Chemical Engineers. (2001). *Layer of protection analysis: simplified process risk assesment.* NY: American Institute of Chemical Engineers.

American Institute of Chemical Engineers. (2008). *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures.*

C. f. C. P. S. o. t. A. I. o. C. E. &. E. Institute. (2018). *BOW TIES IN RISK MANAGEMENT - A Concept Book for Process Safety.* New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Center for Chemical Process Safety - CCPS. (2016). *Risk Assessment and Risk Management.*

ISO 31000, I. (2018). *ISO 31000:2018 - Risk management - Principles and guidelines.* Ginebra: ISO.

NASA. (2002). *Fault Tree Handbook.*

PEMEX. (2019). *Matriz de Riesgos.* México: PEMEX.

Reason, J. (1990). *Human Error.* Cambridge University Press.

Steel, C. (1990). *Risk Estimation: HRN Method.* The Safety & Health Practitioner.



**Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean agradecer, en primer lugar, a la Empresa AVEC ING S.A.S. por permitir hacer uso de sus bases de datos y conocimientos. Y, en segundo lugar, a las autoridades de la Universidad Tecnológica Nacional por el continuo soporte y motivación sin los cuales este trabajo no hubiera podido llevarse a cabo.

# UNA METAHEURÍSTICA BIOBJETIVO PARA EL PROBLEMA DE SECUENCIACIÓN DE MODELOS MIXTOS EN UN ENTORNO FLOWSHOP HEIJUNKA: ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE RESULTADOS EXPERMENTALES

Toncovich, Adrián [1]; Villarreal Fernanda [2]; Rossit, Daniel [3]

*[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur.*
*[2] Departamento de Matemática, Universidad Nacional del Sur.*
*[3] INMABB, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS)-CONICET.*
*atoncovi@uns.edu.ar; fvillarreal@uns.edu.ar; daniel.rossit@uns.edu.ar*

**RESUMEN**

Este trabajo presenta el análisis estadístico detallado de la experimentación completa desarrollada con el fin de evaluar el desempeño de una metaheurística propuesta para resolver el problema de secuenciación de modelos mixtos en un entorno flowshop heijunka, una estrategia aplicable en configuraciones productivas ajustadas (lean manufacturing) para equilibrar la producción, minimizando las variaciones en la carga de trabajo y el flujo de materiales, y simultáneamente alcanzar el máximo aprovechamiento de los recursos productivos, minimizando los tiempos de suministro de producción. Teniendo en cuenta la naturaleza multiobjetivo y la complejidad computacional del problema, se implementa una metaheurística basada en el simulated annealing (recocido simulado) con dos funciones objetivo: una que plantea la verificación de cuotas de producción para diferentes modelos o tipos de artículos y otra que consiste en la minimización del tiempo total requerido de fabricación o makespan. El algoritmo utilizado persigue optimizar la eficiencia en la producción mientras se equilibra el flujo de trabajo y materiales en la instalación bajo diversas prioridades operativas, con el objetivo de ofrecer soluciones que mejoren la secuenciación de pedidos en entornos industriales dinámicos. La metodología fue evaluada mediante treinta réplicas independientes sobre veintitrés planes de demanda del conjunto Nissan-9Eng.I. El análisis estadístico de resultados, confirmó la validez metodológica del enfoque. Se rechazó la hipótesis de uniformidad, demostrando que el algoritmo converge de manera reproducible hacia regiones de alta calidad del espacio de soluciones. Se observó una alta consistencia en los resultados para la mayoría de los escenarios y experimentos. La variación en el hipervolumen y la cobertura confirmó que el rendimiento depende significativamente de las características específicas del plan de demanda. En síntesis, el algoritmo propuesto se confirma como una herramienta eficaz y confiable para abordar la secuenciación en entornos productivos complejos.

**Palabras Claves:** Secuenciación; Flowshop; Heijunka; Optimización de Pareto; Industria 4.0.

**ABSTRACT**

This paper presents a detailed statistical analysis of the complete experimentation carried out to evaluate the performance of a metaheuristic designed to solve the mixed-model sequencing problem in a heijunka flowshop environment—an approach applicable in lean manufacturing settings to balance production by minimizing fluctuations in workload and material flow, while simultaneously maximizing the utilization of productive resources and minimizing production lead times. Considering the multi-objective nature and the computational complexity of the problem, a metaheuristic based on simulated annealing is implemented with two objective functions: one addressing the verification of production quotas for different models or product types, and another focused on minimizing the total required manufacturing time (makespan). The algorithm aims to optimize production efficiency while balancing workflow and material flow under varying operational priorities, providing solutions that improve order sequencing in dynamic industrial environments. The methodology was evaluated through thirty independent replications over twenty-three demand plans from the Nissan-9Eng.I dataset. The experimental results confirmed the methodological validity of the approach. The hypothesis of uniformity was rejected, demonstrating that the algorithm reproducibly converges toward high-quality regions of the solution space. High consistency was observed across most scenarios and experiments. Variations in hypervolume and coverage metrics confirmed that performance depends significantly on the specific characteristics of the demand plan. In summary, the proposed algorithm is validated as an effective and reliable tool for addressing sequencing problems in complex production environments.

**Keywords:** Sequencing; Flowshop; Heijunka; Pareto Optimization; Industry 4.0.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la manufactura moderna, las organizaciones enfrentan el desafío de responder a demandas crecientemente diversificadas sin sacrificar la eficiencia productiva (Framiñán et al., 2014). En particular, los sistemas de producción ajustada (lean manufacturing) requieren herramientas que permitan equilibrar la carga de trabajo, mantener un flujo estable de materiales y, al mismo tiempo, maximizar el aprovechamiento de los recursos disponibles (Marín y Delgado, 2000). Una de las estrategias más utilizadas en este sentido es el nivelado heijunka, que busca nivelar la producción en entornos con modelos mixtos, reduciendo variaciones y favoreciendo la estabilidad operativa (Monden, 2011). Sin embargo, la secuenciación en entornos flowshop heijunka constituye un problema complejo de naturaleza multiobjetivo, cuyo tratamiento requiere enfoques de optimización robustos y eficientes.

Resulta pertinente destacar investigaciones recientes que abordan problemáticas afines en el ámbito de la optimización multiobjetivo aplicada a la secuenciación en entornos industriales. Por ejemplo, el trabajo de Hajji et al. (2024) presenta un enfoque actualizado que combina técnicas metaheurísticas con análisis de desempeño en escenarios de manufactura avanzada, aportando evidencia empírica sobre la eficacia de modelos híbridos en contextos propios de Industria 4.0. Asimismo, otros estudios recientes han explorado variantes del problema de secuenciación en líneas de producción mixtas, integrando criterios de eficiencia energética, sostenibilidad y robustez frente a la variabilidad de la demanda (Paprocka y Krenczyk, 2023; Yu et al., 2024, Farsi et al., 2024).

Ante esta problemática, en muchas situaciones las metaheurísticas se presentan como una alternativa eficaz para abordar la complejidad computacional inherente a este tipo de problemas. En particular, el recocido simulado (simulated annealing) ofrece un marco flexible para explorar soluciones de calidad bajo múltiples criterios de optimización (Ulungu et al., 1999). Este trabajo se centra en el análisis estadístico detallado de la experimentación desarrollada con el fin de evaluar una metaheurística basada en esta técnica, diseñada para considerar dos funciones objetivo: la verificación de cuotas de producción para diferentes modelos de artículos y la minimización del tiempo total de fabricación (makespan) (Zalba y Toncovich, 2022, 2023).

El presente análisis se orienta no solo a evaluar el desempeño del algoritmo propuesto mediante experimentación estadística, sino también a generar aportes prácticos para la toma de decisiones en la industria. A través de los resultados obtenidos, se busca determinar la validez metodológica de la propuesta y su potencial aplicación en entornos industriales dinámicos, donde la secuenciación de pedidos debe ajustarse a prioridades operativas cambiantes y exigencias de competitividad crecientes.

## 2. EL PROBLEMA DE SECUENCIACIÓN *JUST-IN-TIME*

La filosofía de producción just-in-time (JIT) persigue como propósito esencial la obtención de bienes de alta calidad fabricados con un nivel mínimo de inventario y sin incurrir en desperdicios o gastos superfluos. El principio rector de esta metodología consiste en satisfacer los requerimientos de los clientes en el momento exacto en que surgen, en las cantidades precisas necesarias (Womack y Jones, 2003). Entre los resultados que se esperan al aplicar este enfoque se encuentran: la disminución de los plazos de entrega, la ampliación de la capacidad de respuesta del sistema, la mejora continua de la calidad y la reducción de costos. Estos logros se alcanzan mediante la adopción de un esquema logístico de arrastre o sistema pull, que constituye el núcleo operativo de la estrategia JIT (Marín y Delgado, 2000).

En este marco, las prácticas vinculadas a JIT engloban tanto procedimientos tecnológicos como de gestión que buscan garantizar un flujo de materiales flexible, capaz de adaptarse a variaciones de la demanda y de minimizar los residuos generados en el proceso de manufactura. Una de las herramientas más influyentes en la organización de la producción es el nivelado o heijunka, que tiene por finalidad estabilizar la programación diaria mediante la definición de cantidades que, sin ser necesariamente estrictas, marcan una pauta de referencia para las operaciones de corto plazo. Estas cantidades, al no presentar oscilaciones drásticas, permiten a los responsables de producción prever con mayor claridad las necesidades de recursos y establecer luego un plan definitivo de trabajo (Monden, 2011).

El heijunka se traduce en la generación de lotes pequeños y variados dentro de cada jornada, en oposición a la fabricación de largas series de un único artículo. Este tipo de secuenciación equilibrada permite absorber con mayor eficacia las fluctuaciones de la demanda, manteniendo la estabilidad del sistema. Entre los criterios tradicionalmente utilizados para construir secuencias de este tipo en líneas

que producen modelos mixtos se encuentra la regularidad en el consumo de materiales o componentes o la tasa de producción (Miltenburg, 1989; Sumichrast y Russell, 1990).

Cabe señalar que la literatura más reciente ha comenzado a incorporar criterios adicionales en el análisis de la secuenciación bajo entornos JIT y heijunka, tales como la sostenibilidad, la resiliencia de la cadena de suministro y la integración con tecnologías digitales emergentes. En este sentido, el trabajo de Hajji et al. (2024) constituye un aporte relevante al proponer un marco metodológico que combina metaheurísticas con técnicas de aprendizaje automático, lo cual abre nuevas perspectivas para la resolución de problemas complejos de programación de la producción. Estos avances complementan los enfoques clásicos y permiten situar el presente estudio en un contexto de investigación más amplio.

En relación con este trabajo, se ha considerado la necesidad de respetar los principios de nivelación característicos de los sistemas JIT, los cuales a su vez favorecen estrategias de personalización masiva, propias de los entornos de Industria 4.0. Por esta razón, uno de los objetivos planteados consiste en minimizar la desviación con respecto a la nivelación heijunka ($NH$), entendida como la frecuencia con que la secuencia no refleja la mezcla de producción deseada de cada modelo (Bautista-Valhondo, 2021). Asimismo, se incorpora un segundo criterio de desempeño: la reducción del makespan ($C_{máx}$), definido como el mayor tiempo de terminación entre todos los trabajos, con el fin de garantizar la eficiencia y la máxima utilización de los recursos disponibles (Pinedo, 2016).

Las hipótesis adoptadas para la modelización del problema son las siguientes:

- El sistema productivo se configura como un flowshop permutativo, en el cual todos los productos atraviesan las mismas máquinas en idéntico orden de procesamiento.
- Se analiza un escenario determinístico, con un conjunto de trabajos y tiempos de procesamiento conocidos de antemano.
- Cada tarea puede ser procesada en una sola máquina a la vez y, recíprocamente, cada máquina únicamente puede atender un trabajo en cada instante. Todas las máquinas están disponibles en todo momento y no se establecen prioridades de ejecución.
- El tiempo de transferencia de piezas entre estaciones se considera insignificante.
- Se supone que no existen limitaciones de almacenamiento intermedio entre máquinas.
- Los tiempos de preparación (setup) derivados de los cambios de producto son nulos o irrelevantes.

El problema de secuenciación de modelos mixtos en sistemas JIT se puede plantear mediante índices y parámetros que identifican tipos de productos $i$, sus demandas $d_i$, centros de trabajo $l$, tiempos de procesamiento $p_{il}$, y tasas/cuotas de producción ideales $\lambda_i$ (donde: $\lambda_i = d_i / \sum_i d_i$), que se busca mantener en cada posición $k$ de la secuencia de fabricación. Las variables de decisión incluyen la asignación de tipos de artículos a posiciones de la secuencia $X_{ik}$, tiempos de procesamiento, $P_{kl}$, inicio, $B_{kl}$, y finalización, $C_{kl}$, de operaciones, y cantidad de unidades producidas de un tipo de artículo hasta una etapa de la secuencia, $Y_{ik}$.

El modelo de optimización asociado se formula para minimizar dos objetivos ($f_1$ y $f_2$) sujetos a restricciones que aseguran la correcta asignación de trabajos y el flujo de producción (Toncovich et al., 2023, 2024a, 2024b):

$$Minimizar\ \{f_1 = C_{máx}\ y\ f_2 = NH\} \tag{1}$$

En este caso, $f_1$ es el makespan, y $f_2$ es la función objetivo vinculada al nivelado heijunka, que está determinada por la frecuencia de incumplimiento de las tasas/cuotas de producción requeridas para diferentes modelos o tipos de artículos a lo largo de la secuencia de producción.

## 3. ALGORITMO METAHEURÍSTICO BASADO EN SIMULATED ANNEALING

En esta sección se expone el procedimiento algorítmico basado en la técnica de simulated annealing (SA) utilizado para abordar el problema previamente planteado. Simulated annealing constituye una estrategia de búsqueda local estocástica inspirada en el proceso físico de enfriamiento gradual de los metales (Du y Swamy, 2016), que se ha empleado con éxito en la resolución de problemas de optimización de alta complejidad (Rossit et al., 2021a, 2021b).

En los últimos años, se han desarrollado variantes avanzadas del simulated annealing orientadas a problemas multiobjetivo y de alta complejidad en entornos industriales. Por ejemplo, Vargas-Martínez et al. (2023) proponen un marco denominado MOSA/D, basado en descomposición y operadores

evolutivos, que mejora la diversidad y la convergencia hacia el frente de Pareto en problemas con múltiples objetivos. De manera complementaria, Hajji et al. (2024) aplican simulated annealing a un problema de hybrid flow shop scheduling, demostrando la robustez del método en escenarios con restricciones complejas y múltiples etapas de procesamiento. Asimismo, revisiones recientes destacan la tendencia hacia enfoques híbridos que combinan metaheurísticas clásicas con técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático, lo que amplía el potencial de aplicación del simulated annealing en contextos de Industria 4.0 y 5.0 (Zhang et al., 2025). Estas contribuciones refuerzan la pertinencia de considerar variantes modernas del algoritmo y sitúan la presente propuesta dentro de un marco comparativo actualizado y en expansión.

En términos generales, métodos basados en búsqueda local como simulated annealing examinan soluciones vecinas a la actual con el fin de identificar una alternativa de mejor desempeño según el criterio establecido. Este movimiento se repite iterativamente hasta que ya no se encuentren mejoras en el entorno considerado, lo que conduce típicamente a un óptimo local. Para evitar la convergencia prematura, simulated annealing incorpora un mecanismo de aceptación probabilística que permite, en ciertas circunstancias, aceptar soluciones de menor calidad que la actual, lo cual habilita la exploración de regiones más amplias del espacio de soluciones y favorece la búsqueda de óptimos globales.

El procedimiento aplicado se apoya en la estructura clásica del simulated annealing, pero se complementa con dos enfoques adicionales: el PASA (Pareto Archived Simulated Annealing) (Engrand, y Mournay, 1998), que utiliza un archivo de soluciones no dominadas, y el MOSA (MultiObjective Simulated Annealing) (Ulungu et al., 1999), enfoques propios de contextos multiobjetivo.

El algoritmo propuesto combina una función de agregación de objetivos con un esquema de archivo para registrar y actualizar soluciones no dominadas. Dado un conjunto de funciones a minimizar, $f_p, p = 1, 2, \dots, P$, todas positivas, el problema multiobjetivo puede transformarse en uno de minimización escalar mediante:

$$G(S) = \sum_{p=1}^{P} ln(f_p(S)) \quad (1)$$

La variación relativa entre una solución actual $S_a$ y una candidata $S_c$ se expresa como:

$$\Delta G = G(S_c) - G(S_a) = \sum_{p=1}^{P} ln\left(\frac{f_p(S_c)}{f_p(S_a)}\right) \quad (2)$$

- Si $\Delta G \leq 0$, la nueva solución mantiene o mejora el promedio relativo de los valores de las funciones objetivo y se acepta.
- Si $\Delta G > 0$, la solución candidata empeora la media relativa, pero aún puede aceptarse con probabilidad $PA = e^{-\Delta G/T}$, donde $T$ es el parámetro de control, equivalente a la temperatura en el proceso de recocido.

El archivo de soluciones no dominadas se actualiza siguiendo tres reglas:

1. Si $S_c$ está dominada por al menos un elemento del archivo, no se incorpora.
2. Si $S_c$ domina a alguna solución archivada, la reemplaza.
3. Si $S_c$no domina ni es dominada, se agrega al archivo sin eliminar otras.

Para explorar de manera más completa espacio de soluciones, el procedimiento reinicia periódicamente la búsqueda a partir de una solución archivada seleccionada al azar.

El método utiliza los parámetros habituales de simulated annealing:

- $T$: temperatura, que decrece desde un valor inicial $T_0$ hasta un valor final $T_f$.
- $N_{salt}$: número de iteraciones a realizar para un mismo nivel de temperatura.
- $\alpha$: factor de enfriamiento, usualmente en el intervalo [0,8; 0,99].
- $N_{fin}$: número máximo de iteraciones consecutivas sin mejoras.

Esquema del procedimiento SA biobjetivo:

1. Inicialización
   - Se genera una solución inicial $S_0$ mediante un procedimiento constructivo.
   - Se evalúan sus funciones objetivo $f_p(S_0)$.
   - Se incorpora $S_0$ al registro de soluciones eficientes $CE = \{S_0\}$, $Ncont = t = 0, T = T_0$.
   - Se inicializan los parámetros: $T = T_0,\ N_{cont} = 0,\ t = 0$.

2. Iteración
   - Se produce aleatoriamente una solución vecina $S_c \in V(S_a)$.
   - Se evalúan $f_p(S_c)$ y se calcula $\Delta G$.
   - Aceptación:
     i. Si $\Delta G \leq 0$, se acepta $S_c$ ($S_a \leftarrow S_c$, $N_{cont} = 0$).
     ii. Si $\Delta G > 0$, se acepta con probabilidad $PA = e^{-\Delta G/T}$; en caso contrario, se mantiene $S_a$.
   - Se actualiza el archivo de soluciones eficientes considerando el criterio de dominancia.
3. Control de temperatura y parada
   - Cada $N_{salt}$ iteraciones se ajusta la temperatura: $T \leftarrow \alpha T$.
   - El proceso finaliza si $N_{cont} = N_{fin}$ o si $T < T_f$.
4. Salida
   - El algoritmo devuelve el registro $CE$ de las soluciones eficientes aproximadas encontradas durante la búsqueda.

## 4. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

El algoritmo metaheurístico utilizado para resolver el problema planteado fue implementado en el entorno MS Visual Basic for Applications® (versión 7.1) integrado en MS Excel®. Las pruebas se llevaron a cabo en un sistema equipado con procesadores Intel(R) Xeon(R) Silver 4214 de 2,2 GHz (doble procesador), 32 GB de memoria RAM y sistema operativo Windows® 10 Pro.

Para analizar el comportamiento del algoritmo, se procedió en dos etapas. En primer lugar, se realizaron ensayos exploratorios sobre instancias de pequeña escala generadas aleatoriamente. Estos experimentos iniciales tuvieron como finalidad verificar el correcto funcionamiento del algoritmo, ajustar su implementación y parametrización, y contrastar los resultados con las soluciones exactas obtenidas mediante enumeración completa. En una segunda fase, orientada a evaluar la capacidad del procedimiento frente a problemas de mayor envergadura y relevancia práctica, se utilizó el conjunto de instancias Nissan-9Eng.I (Bautista-Valhondo, 2021). Dichas instancias corresponden a una línea de producción de motores conformada por 21 estaciones de trabajo en la cual se deben secuenciar 270 artículos correspondientes a 9 modelos de motores distintos, agrupados, a su vez, en tres familias: SUV (tres modelos), Vans (dos modelos) y Trucks (cuatro modelos). En este caso, la comparación entre ejecuciones se efectuó considerando la aproximación de la frontera de Pareto obtenida a partir de 30 réplicas/corridas independientes del algoritmo, ya que la obtención de la frontera óptima exacta resulta computacionalmente prohibitiva para algunos de los problemas del conjunto, debido al elevado consumo de memoria y tiempo requerido para problemas de esta magnitud. Para cada corrida/réplica se estableció un tiempo máximo de ejecución del algoritmo de una hora.

La evaluación del desempeño se efectuó con base en distintos indicadores de calidad de las soluciones multiobjetivo (Knowles y Corne, 2002), tales como: número de soluciones generadas, diversidad, grado de convergencia hacia la frontera eficiente, hipervolumen alcanzado y esfuerzo computacional en relación con los parámetros de cada instancia.

La Tabla 1 presenta un resumen de los resultados obtenidos a partir de 30 corridas independientes para cada uno de los 23 planes de demanda (experimentos) del conjunto Nissan. Se incluyen indicadores de desempeño del algoritmo propuesto: número promedio de soluciones generadas, número promedio de soluciones no dominadas por la frontera de Pareto aproximada, cobertura promedio, hipervolumen promedio y las respectivas desviaciones estándar. Estos parámetros permiten caracterizar la calidad de los frentes de Pareto obtenidos y la consistencia de resultados entre réplicas.

Se observa que la cobertura promedio presenta una amplia variabilidad entre experimentos, con valores que van desde 6,67 % (experimento 10) hasta 96,67 (experimento 16). En particular, los planes 9, 10, 19, 21 y 22 exhiben los menores valores de cobertura, evidenciando que el algoritmo logra soluciones más regulares y competitivas en estos escenarios. El hipervolumen promedio, métrica ampliamente utilizada en optimización multiobjetivo, también refleja contrastes importantes: mientras el experimento 1 alcanza un valor medio de 143 271,33, otros casos como los experimentos 6, 7 y 9 presentan valores inferiores a 600, lo que indica que la dificultad del problema y las características del plan de demanda influyen directamente en el rendimiento del algoritmo. En la Figura 1 se puede observar la variación del hipervolumen por réplica para cada uno de los experimentos/planes de demanda del conjunto de problemas Nissan-9Eng.I.

*Tabla 1 Resultados obtenidos a partir de las 30 corridas realizadas para cada uno de los planes de demanda/experimentos.*

| Experimento | N° promedio de soluciones de la frontera | Desv. est. del n° de soluciones | N° promedio de soluciones no dominadas de la frontera | Cobertura (%) | Hipervo-lumen promedio | Desv. est. del hipervolumen |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7,80 | 2,98 | 0,33 | 95,20 | 143271,33 | 11009,29 |
| 2 | 6,77 | 2,54 | 0,30 | 94,46 | 9628,80 | 1377,12 |
| 3 | 2,80 | 0,76 | 0,30 | 85,00 | 912,93 | 32,38 |
| 4 | 3,63 | 1,85 | 0,10 | 96,11 | 26100,23 | 2063,14 |
| 5 | 4,13 | 1,48 | 0,97 | 72,02 | 4576,93 | 444,50 |
| 6 | 2,47 | 0,86 | 0,13 | 86,67 | 547,90 | 65,48 |
| 7 | 4,20 | 0,85 | 0,33 | 86,67 | 426,33 | 71,38 |
| 8 | 5,60 | 2,01 | 0,23 | 90,28 | 4524,73 | 516,07 |
| 9 | 1,07 | 0,25 | 0,93 | 96,08 | 7,73 | 1,14 |
| 10 | 4,00 | 0,00 | 2,70 | 6,67 | 1873,57 | 11,10 |
| 11 | 4,20 | 1,69 | 0,10 | 32,50 | 4528,90 | 457,47 |
| 12 | 5,07 | 1,17 | 0,27 | 94,33 | 5266,50 | 605,47 |
| 13 | 5,50 | 1,87 | 0,40 | 93,83 | 12333,83 | 1180,65 |
| 14 | 5,97 | 2,27 | 0,27 | 91,07 | 7837,97 | 879,01 |
| 15 | 3,40 | 1,54 | 0,03 | 92,60 | 6955,07 | 790,28 |
| 16 | 7,00 | 2,60 | 0,47 | 96,67 | 16527,57 | 1450,34 |
| 17 | 5,13 | 1,31 | 0,60 | 92,03 | 3413,57 | 374,35 |
| 18 | 2,20 | 0,66 | 0,13 | 86,28 | 616,90 | 46,44 |
| 19 | 4,30 | 0,60 | 1,73 | 86,67 | 1819,10 | 33,77 |
| 20 | 4,70 | 1,60 | 0,13 | 58,33 | 16802,97 | 1201,23 |
| 21 | 1,47 | 1,25 | 0,80 | 95,00 | 9450,00 | 1607,01 |
| 22 | 4,33 | 0,66 | 1,80 | 20,00 | 6432,17 | 23,64 |
| 23 | 5,50 | 1,93 | 0,20 | 56,44 | 8556,97 | 457,24 |

### 4.1. Pruebas de uniformidad

Para determinar la naturaleza de la distribución de resultados en cada plan de demanda se aplicaron tres pruebas de bondad de ajuste: Kolmogorov-Smirnov (KS), Anderson-Darling (AD) y Cramér-von Mises (CvM) (D'Agostino y Stephens, 1986). Los resultados se resumen en la Tabla 2.

En la mayoría de los experimentos, los $p - values$ resultaron significativamente menores que 0,05, lo que llevó al rechazo de la hipótesis nula de uniformidad ($H0$). Esto implica que los resultados no se distribuyen de manera uniforme, sino que presentan cierta concentración alrededor de valores centrales, lo que indica estabilidad en el desempeño del algoritmo. Solo algunos experimentos (por ejemplo, 8, 11, 13 y 16) presentaron $p - values > 0{,}05$ en el test KS o CvM, aunque fueron igualmente detectados como no uniformes por la prueba A-D, que resulta más sensible a los extremos.

Estos hallazgos permiten confirmar que el algoritmo basado en Simulated Annealing no produce resultados completamente aleatorios entre ejecuciones, sino que tiende a converger hacia regiones específicas del espacio de soluciones, reflejando reproducibilidad y confiabilidad.

### 4.2. Estabilidad de los resultados

Con el fin de profundizar en la evaluación de la robustez del algoritmo, se analizó la estabilidad del hipervolumen a partir de medidas de variabilidad relativas. La Tabla 3 resume los valores de media, desviación estándar, coeficiente de variación ($CV$), mediana, rango intercuartílico ($IQR$), desviación media absoluta ($MAD$) y coeficiente de variación robusto ($CV\_robusto$).

El $CV\_robusto$ refleja la variabilidad relativa de los datos de forma resistente a valores atípicos (outliers) y se calcula de la siguiente manera:

$$CV\_robusto = \frac{MAD}{mediana} \quad (3)$$

donde:

- desviación media absoluta (MAD, Median Absolute Deviation) = $mediana(|x_i - mediana(x_i)|)$

- mediana = $mediana(x_i)$

De acuerdo con los rangos de referencia prácticos para la optimización multiobjetivo, valores de $CV\_robusto$ inferiores a 0,10 corresponden a escenarios moderadamente estables o muy estables. En este estudio, la mayor parte de los experimentos alcanzan $CV\_robusto \leq$ 0,05, lo que refleja una altísima consistencia en los resultados obtenidos (Figura 2). En contraste, los experimentos 11, 16 y 13 muestran $CV\_robusto$ superiores a 0,05, indicando un comportamiento moderadamente estable que refleja cierto grado de variación en el desempeño del algoritmo, aunque el resultado es bastante predecible entre corridas. En el caso del problema 8, con un valor de $CV\_robusto$ de 0,121, se puede afirmar que el algoritmo produce resultados reproducibles en múltiples ejecuciones, garantizando confianza en la comparación entre experimentos, aunque con una dispersión relativa moderada.

La estabilidad en los resultados también se visualiza en la Figura 3, que muestra los boxplots del hipervolumen para los 23 experimentos. Cuanto más estrecho es el diagrama de caja, mayor es la reproducibilidad de los resultados. De forma complementaria, los Q-Q plots (Figura 4) permiten contrastar la distribución empírica con la uniforme. Las desviaciones observadas respecto de la línea diagonal ($y = x$) confirman que los datos se concentran en torno a valores centrales y descartan la hipótesis de uniformidad y, por lo tanto, existen desviaciones sistemáticas hacia arriba o abajo que indican sesgo o concentración en ciertos rangos.

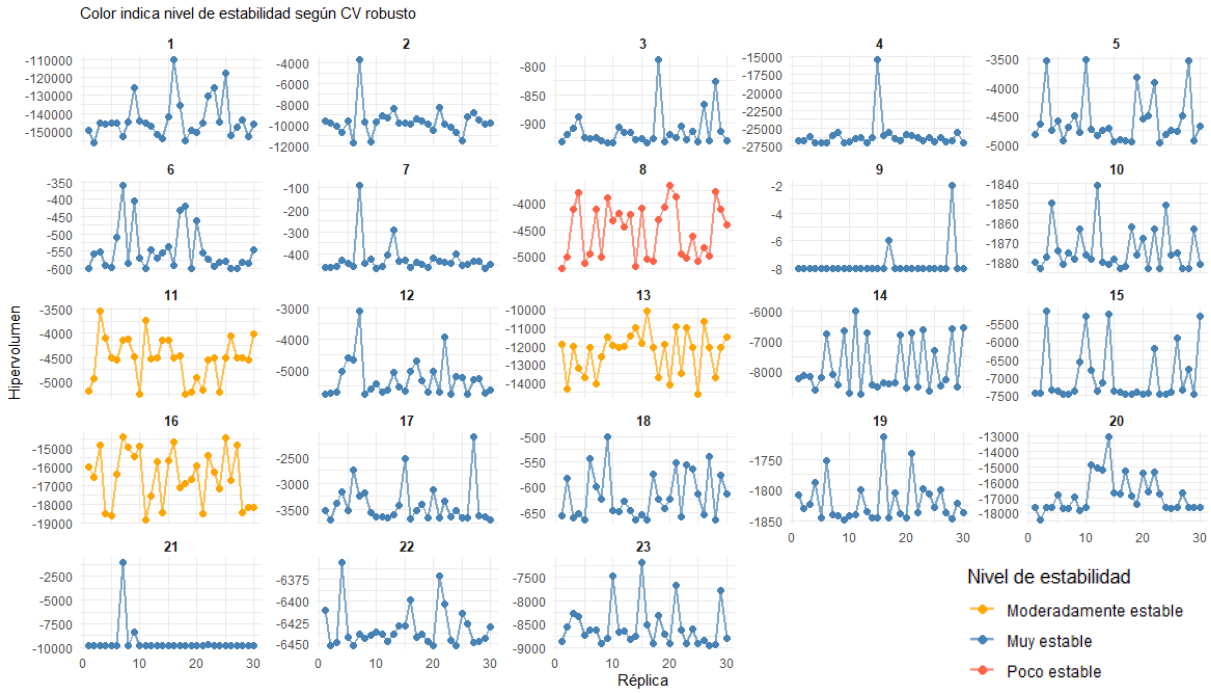



*Figura 1 Variación del hipervolumen por réplica para los 23 experimentos del conjunto Nissan.*

### 4.3. Consideraciones metodológicas

En este trabajo no se emplea la prueba de Kruskal-Wallis, dado que dicha técnica está orientada a contrastar si las distribuciones (en particular las medianas) de varios grupos independientes son iguales. Esta resulta útil si el objetivo radica en comparar rendimiento central (por ejemplo, mediana de hipervolumen) entre configuraciones, algoritmos o escenarios. Sin embargo, el objetivo en este caso no consiste en comparar el rendimiento central del algoritmo entre distintos experimentos, sino evaluar su estabilidad intra-experimento. Dado que se cuenta con 23 instancias (experimentos) correspondientes a 23 planes de demanda en el sistema de producción, el algoritmo se ejecuta 30 veces bajo las mismas condiciones para cada instancia. Resulta de interés, entonces, analizar la consistencia de los resultados de un mismo experimento, lo cual se refleja en la dispersión de los valores obtenidos. Por ello, se recurre a medidas de variabilidad relativa como el coeficiente de variación robusto, que en el contexto de la optimización multiobjetivo se utiliza para evaluar la estabilidad y confiabilidad de los algoritmos, especialmente cuando se realizan múltiples ejecuciones (réplicas) sobre un mismo problema bajo condiciones idénticas de un mismo escenario. Además, se

complementa el análisis con representaciones gráficas de las distribuciones (boxplots), que permiten caracterizar la estabilidad del algoritmo en cada escenario.

*Tabla 2 Resultados de los test de uniformidad a partir de las 30 corridas realizadas para cada uno de los planes de demanda/experimentos.*

| Experimento | KS_pvalue | KS_uniforme | AD_pvalue | AD_uniforme | CvM_pvalue | CvM_uniforme |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3,35E-07 | No | 2E-05 | No | 3,92E-06 | No |
| 2 | 7,66E-09 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 3 | 5,25E-12 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 4 | 6,30E-19 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 5 | 4,84E-07 | No | 2E-05 | No | 5,12E-07 | No |
| 6 | 4,53E-08 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 7 | 1,57E-15 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 8 | 8,85E-02 | Sí | 2E-05 | No | 2,62E-01 | Sí |
| 9 | 4,00E-23 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 10 | 1,91E-07 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 11 | 7,28E-02 | Sí | 2E-05 | No | 6,68E-02 | Sí |
| 12 | 3,13E-09 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 13 | 8,41E-02 | Sí | 2E-05 | No | 2,42E-01 | Sí |
| 14 | 1,12E-05 | No | 2E-05 | No | 3,41E-04 | No |
| 15 | 3,91E-10 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 16 | 8,20E-01 | Sí | 2E-05 | No | 7,03E-01 | Sí |
| 17 | 3,76E-08 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 18 | 1,31E-03 | No | 2E-05 | No | 1,10E-04 | No |
| 19 | 9,00E-07 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 20 | 1,50E-05 | No | 2E-05 | No | 3,79E-05 | No |
| 21 | 8,61E-23 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 22 | 4,35E-08 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |
| 23 | 2,37E-07 | No | 2E-05 | No | 0,00 | No |

### 4.4. Discusión

Los resultados obtenidos permiten extraer varias conclusiones relevantes:

El algoritmo basado en simulated annealing es capaz de generar soluciones consistentes en la mayoría de los escenarios analizados, descartando la hipótesis de uniformidad y confirmando la existencia de distribuciones estables alrededor de valores centrales.

La estabilidad varía entre experimentos, siendo muy alta para la mayoría de casos (en particular para los experimentos 21, 9 y 22, $CV\_robusto \approx 0{,}00$) y moderada en otros, encontrándose para el experimento 8 el peor valor ($CV\_robusto \approx 0{,}121$), lo que refleja la dependencia del rendimiento respecto de las características del plan de demanda.

La combinación de análisis estadísticos (KS, AD, CvM), medidas de robustez ($CV$ y $CV\_robusto$) y representaciones gráficas (boxplots, Q-Q plots) proporciona una caracterización integral del comportamiento del algoritmo, validando su aplicabilidad en contextos industriales dinámicos.

En síntesis, el estudio evidencia que el algoritmo propuesto no solo optimiza las métricas de interés en la secuenciación de modelos mixtos en un entorno flowshop heijunka, sino que también presenta un nivel aceptable de estabilidad y confiabilidad, lo que lo convierte en una alternativa práctica para la toma de decisiones en escenarios productivos complejos.

No obstante, cabe consignar que durante las pruebas surgieron ciertas dificultades, para algunos de los planes de demanda/experimentos, vinculadas con la calibración de parámetros del algoritmo, dado

que el ajuste manual no siempre permitió alcanzar el mejor rendimiento en todas las instancias. De este modo, se abre la perspectiva de profundizar en desarrollos futuros orientados a mecanismos de ajuste automático de parámetros que potencien el desempeño de la metaheurística biobjetivo propuesta.

*Tabla 3 Resultados de la estabilidad del hipervolumen obtenidos a partir de las 30 corridas realizadas para cada uno de los planes de demanda/experimentos.*

| Experimento | Media | Desvío estándar | CV | Mediana | IQR | MAD | CV_robusto (en valor absoluto) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 4524,73 | 516,07 | 0,114 | 4430,5 | 920,75 | 537,0 | 0,121 |
| 11 | 4528,90 | 457,47 | 0,101 | 4509,0 | 677,50 | 367,0 | 0,081 |
| 16 | 16527,57 | 1450,348 | 0,088 | 16466,0 | 2634,25 | 1328,5 | 0,081 |
| 13 | 12333,83 | 1180,65 | 0,096 | 12073,5 | 1813,25 | 615,5 | 0,051 |
| 18 | 616,90 | 46,44 | 0,075 | 627,0 | 76,50 | 31,0, | 0,049 |
| 12 | 5266,50 | 605,47 | 0,115 | 5473,0, | 659,25 | 260,5 | 0,048 |
| 6 | 547,90 | 65,48 | 0,120 | 5720, | 46,00 | 23,0 | 0,040 |
| 5 | 4576,93 | 444,50 | 0,097 | 47430 | 319,50 | 177,0 | 0,037 |
| 2 | 9628,80 | 1377,12 | 0,143 | 9770,5 | 595,50 | 355,5 | 0,036 |
| 17 | 3413,57 | 374,35 | 0,110 | 3541,0, | 299,25 | 124,0 | 0,035 |
| 14 | 7837,97 | 879,01 | 0,112 | 8266,5 | 1738,75 | 275,0 | 0,033 |
| 7 | 426,33 | 71,38 | 0,167 | 4440, | 25,50 | 13,5 | 0,030 |
| 20 | 16802,97 | 1201,23 | 0,071 | 171850, | 998,50 | 472,5 | 0,027 |
| 1 | 143271,33 | 11009,29 | 0,077 | 145428,5 | 6405,50 | 3888,0 | 0,027 |
| 23 | 8556,97 | 457,24 | 0,053 | 8690,0 | 340,00 | 177,5 | 0,020 |
| 4 | 26100,23 | 2063,14 | 0,079 | 26472,0 | 754,50 | 396,5 | 0,015 |
| 15 | 6955,07 | 790,28 | 0,114 | 7381,0 | 680,50 | 76,0 | 0,010 |
| 3 | 912,93 | 32,38 | 0,035 | 925,0 | 17,00 | 7,0 | 0,008 |
| 19 | 1819,10 | 33,77 | 0,019 | 1835,0 | 36,50 | 10,0, | 0,005 |
| 10 | 1873,57 | 11,10 | 0,006 | 1877,5 | 11,50 | 40 | 0,002 |
| 22 | 6432,17 | 23,64 | 0,004 | 6439,5 | 18,00 | 9,5 | 0,001 |
| 9 | 7,73 | 1,14 | 0,148 | 8,0 | 0,00 | 0,0 | 0,000 |
| 21 | 9450,00 | 1607,01 | 0,170 | 9792,0 | 0,00 | 0,0 | 0,000 |

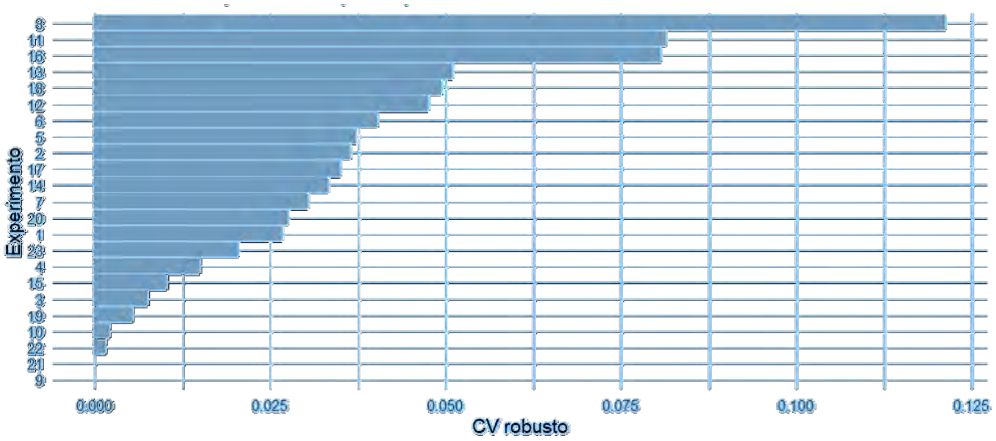



*Figura 2 CV_robusto del hipervolumen calculado para los 23 experimentos del conjunto Nissan.*

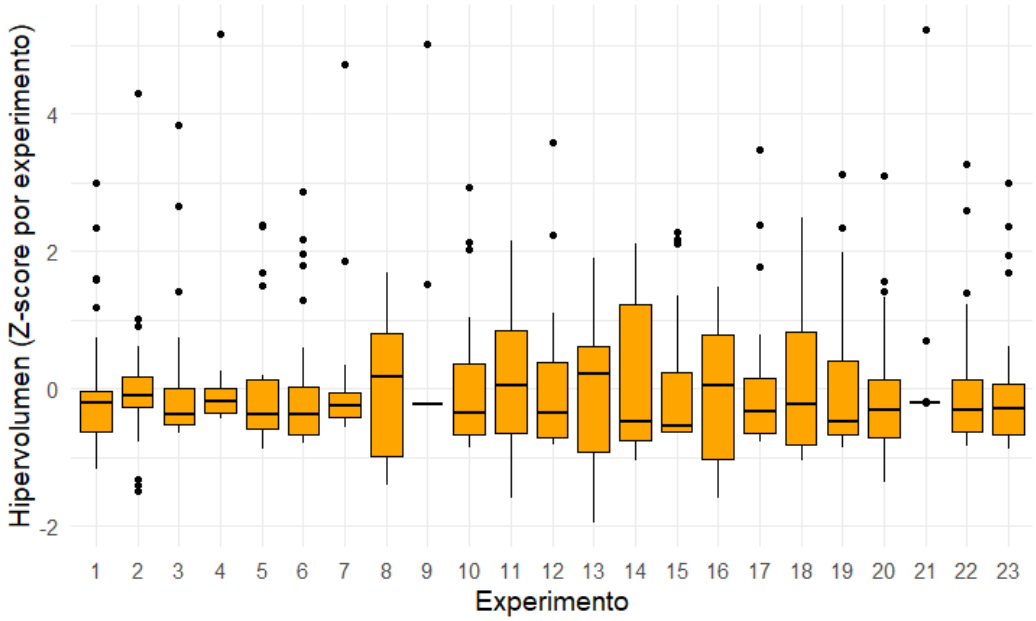



*Figura 3 Gráfico boxplot del hipervolumen estandarizado por experimento para los 23 experimentos del conjunto Nissan.*

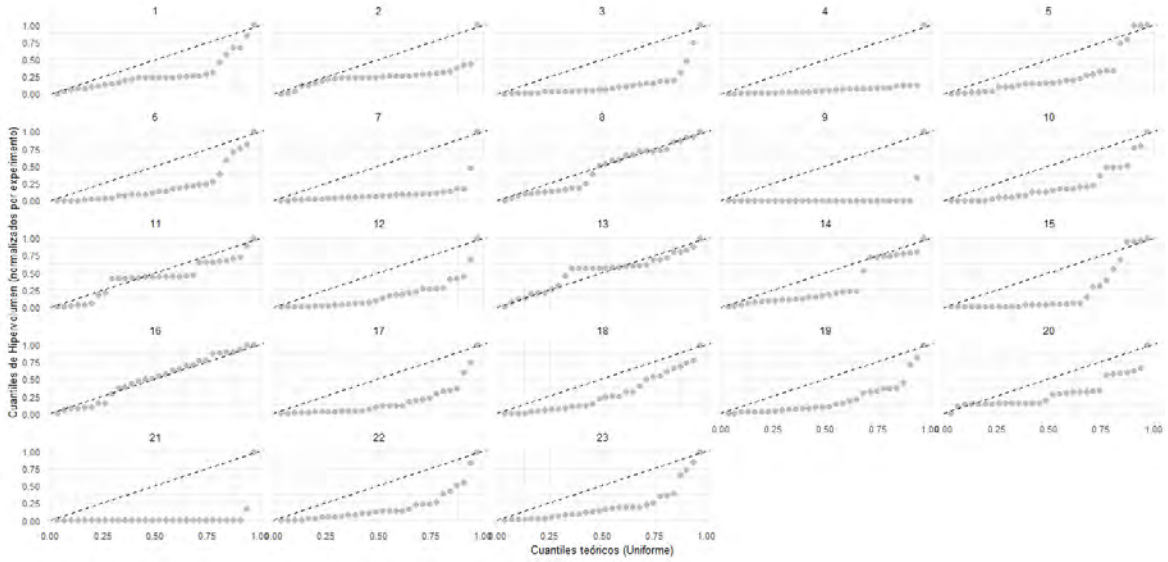



*Figura 4 Gráfico Q-Q plot con cuantiles uniformes del hipervolumen para los 23 experimentos del conjunto Nissan.*

## 5. CONCLUSIONES

El presente trabajo analizó el comportamiento de un algoritmo metaheurístico basado en el recocido simulado aplicado al problema de secuenciación de modelos mixtos en un entorno flowshop heijunka. A partir de 23 planes de demanda y 30 corridas independientes por escenario, se evaluaron métricas de desempeño como el número de soluciones, la cobertura y el hipervolumen, junto con indicadores de estabilidad intra-experimento.

Los principales hallazgos pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Rechazo de la hipótesis de uniformidad: los resultados experimentales muestran que las soluciones obtenidas no se distribuyen de manera uniforme, sino que tienden a concentrarse en torno a valores centrales. Esto confirma que el algoritmo no actúa como un generador aleatorio, sino que presenta un patrón de convergencia hacia regiones de alta calidad en el espacio de soluciones.
- Estabilidad variable entre escenarios: si bien en la mayoría de los experimentos se alcanzaron coeficientes de variación robustos muy bajos ($CV\_robusto \leq 0{,}05$), reflejando

una elevada consistencia y confiabilidad, algunos casos presentaron cierta dispersión ($CV\_robusto > 0{,}05$), lo que evidencia que el rendimiento del algoritmo depende en gran medida de las características específicas del plan de demanda.

- Validez metodológica de los indicadores utilizados: la combinación de pruebas estadísticas (KS, AD, CvM), métricas de robustez ($CV$ y $CV\_robusto$) y herramientas gráficas (boxplots y Q-Q plots) permitió caracterizar de forma integral el grado de estabilidad de los resultados, aportando una visión más completa que el uso aislado de métricas de desempeño promedio.

En conjunto, estos resultados demuestran que el algoritmo propuesto constituye una herramienta eficaz y confiable para abordar problemas de secuenciación en entornos productivos ajustados, al proporcionar soluciones estables y de calidad en la mayoría de los casos. No obstante, la variabilidad observada en algunos experimentos sugiere la necesidad de profundizar en el ajuste de parámetros y en la exploración de estrategias híbridas que potencien la robustez del enfoque.

Como trabajo futuro, se propone ampliar el análisis hacia la comparación con otros algoritmos metaheurísticos de referencia en optimización multiobjetivo, así como la aplicación del modelo en entornos industriales reales para validar su utilidad práctica en la toma de decisiones.

El análisis efectuado abre diversas líneas de investigación que pueden fortalecer y ampliar los resultados obtenidos:

- Ajuste automático de parámetros: implementar estrategias adaptativas o de autoajuste que permitan mejorar el desempeño del simulated annealing en distintos escenarios sin requerir calibraciones manuales.
- Comparación con otros metaheurísticos: contrastar el algoritmo con enfoques consolidados en optimización multiobjetivo, como NSGA-II, MOEA/D o enfoques híbridos, con el fin de evaluar fortalezas y debilidades relativas.
- Integración en entornos híbridos: explorar variantes que combinen el simulated annealing con técnicas de búsqueda local intensiva o algoritmos poblacionales, buscando aumentar la robustez y la capacidad exploratoria.
- Extensión del análisis estadístico: incorporar métricas adicionales de estabilidad y eficiencia, así como estudios de sensibilidad que permitan comprender mejor la relación entre características del problema y comportamiento del algoritmo.

## 6. REFERENCIAS


Bautista-Valhondo, J. (2021). Exact and heuristic procedures for the Heijunka-flow shop scheduling problem with minimum makespan and job replicas. Progress in Artificial Intelligence, 10(4), 465-488. https://doi.org/10.1007/s13748-021-00249-z

D'Agostino, R.B.; Stephens, M.A. (Eds.) (1986). Goodness-of-fit techniques. New York: Marcel Dekker.

Du, K.-L.; Swamy, M.N.S. (2016). Search and optimization by metaheuristics: Techniques and algorithms inspired by nature. Suiza: Springer International. DOI: 10.1007/978-3-319-41192-7

Engrand, P.; Mournay, X. (1998). Une méthode originale d'optimisation multiobjectif. Reporte Técnico HT-14/97/035/A, EDF-DER.

Farsi, A.; Mokhtarzadeh, M.; Rabbani, M.; Manavizadeh, N.; Anaraki, M.G. (2024). Using parallel metaheuristics to solve a parallel U-shaped robotic mixed-model assembly line balancing and sequencing problem. Soft Computing, 28, 12603-12621. https://doi.org/10.1007/s00500-024-10311-2

Framiñán, J.M.; Leisten, R.; García, R.R. (2014). Manufacturing Scheduling systems. Londres: Springer.

Hajji, M.K., Hamlaoui, O., Hadda, H. (2024). A simulated annealing metaheuristic approach to hybrid flow shop scheduling problem. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 9, 100144. doi.org/10.1016/j.aime.2024.100144

Knowles, J.; Corne, D. (2002). On metrics for comparing nondominated sets. En: Congress on Evolutionary Computation (CEC2002). Honolulu, Estados Unidos.

Marín, F.; Delgado, J. (2000). Las técnicas justo a tiempo y su repercusión en los sistemas de producción. Revista de Economía Industrial, 331, 35-41.

Miltenburg, J. (1989). Level schedules for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems. Management Science, 35(2), 192-207. https://doi.org/10.1287/mnsc.35.2.192

Monden, Y. (2011). Toyota production system: an integrated approach to just-in-time. New York: Productivity Press.

Paprocka, I.; Krenczyk, D. (2023). On Energy Consumption and Productivity in a Mixed-Model Assembly

Line Sequencing Problem. Energies, 16(20), 7091. https://doi.org/10.3390/en16207091
Pinedo, M.L. (2016). Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. 5.ª edición. Heidelberg: Springer Cham. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-26580-3
Rossit, D.A.; Toncovich, A.; Rossit, D.G.; Nesmachnow, S. (2021a). Flow Shop Scheduling Problems in Industry 4.0 Production Environments: Missing Operation Case. Handbook of Smart Materials, Technologies, and Devices: Applications of Industry 4.0, 1-23.
Rossit, D.A.; Toncovich, A.; Rossit, D.G.; Nesmachnow, S. (2021b). Solving a flow shop scheduling problem with missing operations in an Industry 4.0 production environment. Journal of Project Management, 6 (1), 33-44.
Toncovich, A. A.; Rossit, D. A.; Villarreal, F. S. (2023). The flowshop sequencing problem for repetitive jobs under a heijunka environment: a mathematical programming model. En: XXI SEPROSUL - Semana de Engenharia de Produção e Mecânica Sulamericana. Santa María. Santa María, Brasil.
Toncovich, A. A.; Rossit, D. A.; Villarreal, F. S. (2024a). Modelos alternativos de programación matemática para el problema de secuenciación de trabajos repetitivos en entornos flowshop heijunka. En: XXII SEPROSUL - Semana de Engenharia de Produção e Mecânica Sulamericana, Montevideo, Uruguay.
Toncovich, A. A.; Rossit, D. A.; Villarreal, F. S. (2024b). Problemas de scheduling flow shop en entornos Industria 4.0 bajo un enfoque de lean manufacturing: Una revisión de la literatura. En: 53 Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (53JAIIO) - Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa (SIIIO). Bahía Blanca, Argentina.
Sumichrast, R.; Russell, R. (1990). Evaluating mixed-model assembly line sequencing heuristics for JIT production systems. Journal of Operations Management, 9(3), 371-390.
Ulugu, E.; Teghem, J.; Fortemps, P.; Tuytttens, D. (1999). MOSA method: a tool for solving multiobjective combinatorial optimization problems. Journal of Multicriteria Decision Analysis, 8(4), 221-236.
Vargas-Martínez, M.; Rangel-Valdez, N.; Fernández, E.; Gómez-Santillán, C.; & Morales-Rodríguez, M. L. (2023). Performance Analysis of Multi-Objective Simulated Annealing Based on Decomposition. Mathematical and Computational Applications, 28(2), 38. https://doi.org/10.3390/mca28020038
Womack, J. P.; Jones, D. T. (2003). Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation. New York: Free Press.
Yu, F.; Lu, C., Zhou, J.; Yin, Lvjiang (2024). Mathematical model and knowledge-based iterated greedy algorithm for distributed assembly hybrid flow shop scheduling problem with dual-resource constraints. Expert Systems with Applications: An International Journal, 239 (C), 122434. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122434
Zalba,V.; Toncovich, A. A. (2023): Una metaheurística biobjetivo para el problema de secuenciación de trabajos repetitivos en una configuración productiva flowshop heijunka. AACINI - Revista Internacional de Ingeniería Industrial, 7, 5-20.
Zalba,V.; Toncovich, A.A. (2022). Una metaheurística biobjetivo para el problema de secuenciación de trabajos repetitivos en una configuración productiva flowshop heijunka. En: XV Congreso Internacional de Ingeniería Industrial (COINI 2022). Mar del Plata, Argentina.
Zhang, W.; Bao, X., Hao, X.; Gen, M. (2025). Metaheuristics for multi-objective scheduling problems in industry 4.0 and 5.0: a state-of-the-arts survey. Frontiers in Industrial Engineering, 3, 1540022. https://doi.org/10.3389/fieng.2025.1540022

**Agradecimientos**

Este trabajo fue financiado por los proyectos de investigación 24/J096 y PGI 27/ZJ49 de la Universidad Nacional del Sur.

# DIAGNÓSTICO LOGÍSTICO DE LAS TIENDAS DE BARRIO PERTENECIENTES AL SECTOR RIOMAR DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA

ARIZA QUIROZ FRANCISCO ANTONIO
GUTIERREZ DE LA HOZ ALDEMAR ANTONIO

*CRISTIAN JOSÉ SOLANO PAYARES*
*DIRECTOR(A) DEL TRABAJO DE GRADO*

*ROBERTO JOSÉ HERRERA ACOSTA*
*CODIRECTOR (A) DEL TRABAJO DE GRADO*

*PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL*
*FACULTAD DE INGENIERÍA*
*UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO*
*PUERTO COLOMBIA*
*2025*

**RESUMEN**

Esta investigación tiene como objetivo diagnosticar las operaciones de abastecimiento, inventarios y almacenamiento de las tiendas de barrio en la localidad de Riomar, Barranquilla, dada su relevancia en la comercialización de productos de consumo masivo. A nivel mundial, existen más de 50 millones de estas tiendas, especialmente en India, China y América Latina (México, Colombia, Honduras), y pueden representar hasta el 95% del mercado de productos de consumo, el estudio fue de tipo descriptivo y experimental, basado en encuestas estructuradas y análisis estadístico mediante técnicas multivariadas, como el análisis de correspondencia múltiple, para identificar patrones entre variables, los resultados revelan tendencias claras en las decisiones de compra de los tenderos, el portafolio de productos ofrecido y su relación con los hábitos de consumo del sector. Se evidenció también la gestión de inventarios, la atención a las fechas de vencimiento y las condiciones de almacenamiento. Además, se exploró la percepción sobre el uso de tecnologías, encontrando un rezago en su adopción.

Finalmente, se destacó la importancia de la fidelidad entre tenderos y proveedores, y su influencia en la dinámica del canal tradicional. Este estudio aporta información valiosa para comprender el comercio minorista urbano y fundamentar estrategias de mejora logística y colaboración en la cadena de abastecimiento.

**Palabras Claves:** tiendas de barrio, diagnóstico, logística, cadena de abastecimiento, multivariados.

**ABSTRACT**

This research aims to diagnose the supply, inventory, and storage operations of nanostores in the Riomar district of Barranquilla, given their relevance in the commercialization of mass-consumption products. Globally, there are more than 50 million of these stores, especially in India, China, and Latin America (Mexico, Colombia, Honduras), and they can account for up to 95% of the mass-consumption product market, the study was descriptive and experimental, based on structured surveys and statistical analysis using multivariate techniques such as multiple correspondence analysis to identify patterns among variables, the results reveal clear trends in shopkeepers' purchasing decisions, the product portfolios offered, and their relationship with consumer habits in the sector. Evidence was also found regarding inventory management, attention to expiration dates, and storage conditions. In addition, the perception of technology adoption was explored, highlighting a lag in its implementation.

Finally, the importance of loyalty between shopkeepers and suppliers was emphasized, as well as its influence on the dynamics of the traditional channel. This study provides valuable insights for understanding urban retail trade and lays the foundation for strategies aimed at strengthening logistics processes and fostering collaboration within the supply chain.

**Keywords**: Nanostores, Diagnostics, Logistics, Supply chain, Multivariate.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las tiendas de barrio en la ciudad de Barranquilla son unos establecimientos comerciales representativos para la economía local, gracias a estos tipos de comercios se generan empleos y proporcionan acceso de los productos alimenticios para las necesidades básicas de la población barranquillera, especialmente para los estratos socioeconómicos más vulnerables que es donde está ubicados la mayor parte de estos locales y tienen el mayor consumo, por otro lado, estos canales están enfrentado una competencia de las nuevas tiendas de descuentos duros como Ara, D1 e Ísimo, donde están optando por atraer el mismo público, ofreciendo una variedad de artículos commodities de buena calidad a muy buen precio, además ubicándose estratégicamente por toda la ciudad, para que así el consumidor se le haga fácil realizar su compra.

Por eso, las tiendas de barrio están en la obligación de contrarrestar esta ola de competidores sino quieren perder presencia en el mercado, por ende, un aspecto fundamental que les permita a los tenderos mejorar la experiencia de los clientes y ayude a su fidelización con el negocio, es la manera en que es entregado los artículos que el público demande, es decir, que cumpla con las condiciones requeridas, como lo concluye un estudio en Panamá publicado en la revista científica Ciencia Latina, la administración de la cadena de suministro es un elemento estratégico crucial en los nuevos modelos de negocios, a través de la investigación documental, se ha demostrado que una adecuada implementación y gestión de la cadena de suministro contribuye de manera significativa al éxito y la competitividad de las empresas en el entorno empresarial actual, y la forma para que esto se cumpla de manera efectiva, es entendiendo cómo funciona la cadena de suministro de estos canales (Campos Portugal, 2023), y asimismo poniendo en función de los consumidores el equilibrar los diferentes aspectos que involucran la cadena de suministro, tomando en cuenta el entorno, nos permitirá evolucionar a un modelo de cadena de suministro centrado en el cliente. Si hacemos esto bien, uno de los beneficios que recibiremos es la fidelización del cliente hacia nuestro negocio. Al generar experiencias positivas, lo más probable es que el cliente no sólo regrese, sino que te recomendará con sus allegados.

Esta investigación abordó los aspectos de los eslabones de la cadena de suministros de las tiendas de barrio, es decir, se concentró en indagar la manera en que los tenderos reciben su mercancía, la forma en que la distribuyen en su limitado espacio de almacenamiento y si utilizan alguna lógica para definir la organización de los productos, además si mantienen inventario y qué consideraciones tienen presentes para definir las cantidades a almacenar, por último, que criterio utiliza para la selección de los productos.

La estrategia de trabajo estuvo bajo la modalidad bidireccional, donde se partió de una encuesta a los tenderos, y que a su vez tuvo un análisis de observación directa de parte de encuestador que facilito la comprensión del proceso logístico del establecimiento, posteriormente, se recopiló todos los datos obtenidos, para un análisis conjunto y encontrar patrones de comportamiento en los diferentes procesos analizados y al final se realizó recomendaciones pertinentes para mejorar la competitividad del canal ante los nuevos actores del retail que están apareciendo en el mercado.

En definitiva, esta investigación encontró la importancia de la logística en los canales de comercialización tradicionales o como se conoce coloquialmente las tiendas de barrio, es decir, el diagnostico logístico permitió comprender las características más relevantes de los procesos de abastecimiento, inventarios y almacenamiento; así como sus limitaciones y problemáticas actuales; con el fin de identificar las oportunidades de mejoramiento operativo.

### 1.1 Descripción del problema

En la localidad de Riomar, Barranquilla, las tiendas de barrio enfrentan múltiples retos logísticos. Pese a ser el principal canal de distribución de productos básicos para miles de hogares, carecen de procesos estructurados para la adquisición, recibo y despacho de mercancías. Esto las expone a ineficiencias en costos y a limitaciones para competir con cadenas más organizadas.

### 1.2 Formulación del problema

¿Cuáles son los estándares de desempeño logístico que se deben establecer en el canal tradicional de la ciudad de Barranquilla, localidad Riomar, para alcanzar una eficacia operativa y competitividad en el mercado actual?

### 1.3 Antecedentes y justificación

Las tiendas de barrio han demostrado resiliencia frente a las transformaciones del comercio, implementando servicios de entrega a domicilio, ampliación de portafolios y adaptaciones post pandemia. No obstante, la creciente penetración de los hard discount y la baja adopción de tecnologías digitales representan amenazas considerables. De allí que se justifique realizar un diagnóstico logístico que permita comprender las condiciones actuales, generar conocimiento y apoyar tanto a tenderos como a gremios y entidades públicas en la formulación de estrategias de fortalecimiento.

### 1.4 Objetivos de la investigación

• Objetivo general: Diagnosticar el estado logístico actual del canal tradicional en la localidad de Riomar, Barranquilla, identificando estándares de desempeño logístico y oportunidades de mejora.

• Objetivos específicos:

- Definir las condiciones que determinan las operaciones logísticas en el canal tradicional.
- Caracterizar los aspectos logísticos de las tiendas de barrio en la localidad de Riomar.
- Establecer medidas de desempeño logístico que aporten información valiosa a gremios, tenderos y entidades públicas.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1 Marco teórico

La logística moderna se entiende como un proceso integral que va más allá del transporte y almacenamiento, orientándose hacia la gestión de la cadena de suministro. En este marco, los canales de distribución tradicionales, como las tiendas de barrio, cumplen un papel fundamental en el retail latinoamericano. Estos negocios, generalmente de carácter familiar y microempresarial, se enfocan en la venta de productos de primera necesidad en pequeñas cantidades, lo que los convierte en actores claves para la seguridad alimentaria y la inclusión económica.

La literatura también señala que estos negocios enfrentan dificultades en administración de inventarios, regularidad de proveedores y baja adopción de tecnologías (Castellanos, 2008; Avelino, s.f.). La formación en gestión empresarial y logística aparece como un factor determinante para mejorar su competitividad (Meneses et al., 2017).

### 2.2 Marco espacial

La investigación se desarrolló en la localidad de Riomar, ubicada en el norte de la ciudad de Barranquilla, caracterizada por una diversidad de estratos socioeconómicos y una gran densidad de tiendas de barrio. La cercanía de esta zona con corredores viales y centros de distribución la convierte en un entorno estratégico para analizar dinámicas logísticas. Las tiendas allí presentan diferentes grados de modernización: algunas conservan prácticas tradicionales, mientras otras han incorporado sistemas de facturación, inventarios digitales y medios de pago electrónicos.

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Tipo de estudio

El estudio fue de carácter exploratorio y descriptivo. Exploratorio, porque aborda un fenómeno poco estudiado como son los procesos logísticos en tiendas de barrio de Riomar; y descriptivo, porque buscó detallar las prácticas observadas en inventarios, abastecimiento, almacenamiento y adopción tecnológica.

### 3.2 Fases metodológicas

La investigación se organizó en tres fases:

- Fase de recolección bibliográfica.
- Fase de diseño y aplicación de encuestas.
- Fase de análisis y diagnóstico.

#### 3.2.1 Fase de recolección bibliográfica

Se revisaron fuentes primarias y secundarias para comprender el contexto de las tiendas de barrio, incluyendo entrevistas a expertos y gremios como UNDECO y FENALCO, además de bases de datos académicas y estadísticas.

#### 3.2.2 Fase de diseño y aplicación

Se diseñó una encuesta estructurada, validada por expertos, que fue aplicada en 48 tiendas de la localidad de Riomar. El instrumento incluyó bloques sobre abastecimiento, inventarios, almacenamiento y uso de tecnología.

### 3.2.3 Fase de análisis y diagnóstico

Los datos recolectados se procesaron en Excel y RStudio, utilizando análisis descriptivos y multivariados, como análisis de correspondencias múltiples. Esto permitió identificar patrones de consumo, gestión de inventarios y estrategias de abastecimiento.

### 3.2.4 Selección de variables y categorías de productos

Se clasificaron 16 subcategorías de productos de la canasta familiar, pero se seleccionaron para el análisis multivariado aquellas de mayor rotación: frutas y verduras, abarrotes, lácteos, carnes sin procesar bebidas y cuidado personal.

### 3.3 Consolidación y análisis documental

Además de las encuestas, se realizó un análisis documental de los procesos logísticos de las tiendas de barrio, enfocándose en la logística, la administración de inventarios y las estrategias empíricas de abastecimiento.

### 3.3.1 Logística

La logística en tiendas de barrio se caracteriza por la flexibilidad, la atención personalizada y la adaptación a la demanda diaria. Estos negocios compiten diferenciándose en servicio, cercanía y relaciones de confianza con los consumidores.

### 3.3.2 Administración de inventarios

La gestión de inventarios resulta crítica debido a los espacios limitados y la alta rotación de productos perecederos. La falta de herramientas tecnológicas genera sobrecostos y pérdidas por vencimiento, pero también abre oportunidades para implementar soluciones de bajo costo.

### 3.3.3 Estrategias empíricas de abastecimiento

Los tenderos aplican estrategias basadas en la experiencia, como el crédito informal, las relaciones de confianza con proveedores y el aprovechamiento de promociones. Estas prácticas, aunque efectivas en el corto plazo, carecen de estandarización y limitan la capacidad de planificación a largo plazo.

## 4. Diseño muestral.

Para el estudio de la población se optó por la técnica de muestreo por asignación proporcional, esto dado que en la ciudad de barranquilla está distribuida por siete localidades las cual nuestro objetico es la localidad de Riomar, la fórmula utilizada fue la siguiente:

$$\boldsymbol{n = \frac{N(\sum_{h=1}^{L} w_h(pq))^2}{N\frac{B^2}{4} + \sum_{1}^{L} w_h(pq))^2}}$$

Donde:

N: La población total. (2823)

$\boldsymbol{w_h}$**:** El peso relativo de cada localidad. (174)

p: Proporción esperada. (0,5)

q: Proporción complementaria. (0,5)

B: Error de estimación. (3%)

n: Tamaño de la muestra global.

$$n = \frac{2823 * (0.50^2)}{2823 * \frac{0.03^2}{4} + (2823 * 0.25)}$$

Sustituyendo los valores de la ecuación antes mencionada se obtuvo un tamaño de muestra de **48** tiendas para la localidad de Riomar.

Después de tener el número de tiendas que determinaron la muestra de la población significativa de la misma las cuales fueron 48 tiendas se procedió a elegir que barrios del sector de Riomar eran más factible para hacer los registros de las encuestas, los barrios donde se decidió hacer el trabajado de campo fueron Altos de Riomar, Corregimiento la playa, El limoncito, El poblado, San salvador y el barrio San Vicente, estas encuestas fueron tomadas de dos formas, la primera de manera manual, es decir se imprimió en hojas todas las preguntas que se iban a realizar y después de completar esta información en papel se procedía hacer el ingreso en el registro digital de la encuestas, la segunda forma en la que se registraron las encuestas fue de manera directa en el formulario, es decir desde el dispositivo celular o teléfono y se guardaban, Cuando la información de las repuestas estuvo consolidad en la base de datos de un archivo Excel, se optó por una purificación de aquellas respuestas que no se registraron de forma correcta, aclarando que no estamos exento al error humano y por ende tomo la decisión de hacer la depuración.
Para la fase del análisis descriptivo de las respuestas obtenidas sobre las tiendas, se tomó la sabia decisión de crear una tabla dinámica en Excel para así contar todas opciones escogidas por los tenderos en cada una de las preguntas realizadas, con la finalidad de conocer aquellos patrones o tendencias según las respuestas registradas, este proceso se hizo con todas las preguntas para dar claridad sobre las generalidades de una tienda de barrio del sector de Riomar.

Para el estudio multivariable se optó por un software de cogido llamado Rstudio, se utilizó un código de 35 líneas donde este extrae la información de base de datos del Excel, utilizando un sistema sofisticado que analiza las varianzas en las distintas dimensiones de una variable relacionándolas en un gráfico de dos ejes (X y Y), después de esta sucesión del código el software imprime un biplot de los gráficos que sirvieron para su respectivo análisis.

**4.1 selección de las categorías seleccionadas para el análisis descriptivo y multivariable**.
De la lista inicial de subcategorías disponibles en las tiendas de barrio, se seleccionaron frutas y verduras, carnes sin procesar, abarrotes, lácteos, bebidas y cuidado personal, dado que representan productos de mayor rotación, consumo recurrente y necesidad prioritaria para los hogares, estas categorías concentran alimentos de primera necesidad y productos esenciales para la dieta y el bienestar diario de las familias barranquilleras de la localidad de Riomar , además de productos de cuidado personal que forman parte de las necesidades básicas de higiene de los consumidores, la selección de categorías de productos para el análisis se realizó con base en tres criterios principales, ver tabla 1.

- Relevancia dentro de la canasta básica de consumo del hogar colombiano.
- Alta frecuencia de comercialización en las tiendas de barrio del sector Riomar, según observaciones de campo y literatura.
- Relación directa con los objetivos del estudio, orientados a caracterizar los productos que contribuyen significativamente al flujo de ventas y al abastecimiento en las tiendas de barrio.

Tabla 1. Categorías seleccionadas para el análisis descriptivo y multivariable.

| Subcategorías | Ejemplos de productos |
|---|---|
| Frutas y verduras | Plátano, manzanas, cebolla, tomate, bananos, zanahoria. |
| Carnes sin procesar | Pollo entero, carne de res, carne de cerdo, pescado fresco. |
| Abarrotes | Arroz, frijoles, lentejas, azúcar, harina, aceite de cocina. |
| Lácteos | Leche, yogur, queso, mantequilla, kumis |
| Bebidas | Jugos en caja, gaseosas, té embotellado, agua en botella |
| Aseo del Hogar | Detergente, cloro, esponjas, limpiavidrios, escobas |

Fuente. Elaboración propia.

Con esta selección, se garantizó un análisis enfocado y coherente con los objetivos de diagnosticar el canal de comercialización de productos de primera necesidad en las tiendas de barrio del sector Riomar, permitiendo identificar patrones de compra, almacenamiento y rotación de productos relevantes para la seguridad alimentaria de la comunidad, además se pudo simplificar el estudio multivariable en los planos bidimensionales.

**4.2 Validación estadística**

La última validación para corroborar el instrumento final con todas las correcciones aplicadas fue realizar un análisis estadístico. La confiabilidad de una medición o de un instrumento, según el propósito de la primera y ciertas características del segundo, puede tomar varias formas o expresiones al ser medida o estimada: coeficientes de precisión, estabilidad, equivalencia, homogeneidad o consistencia interna, pero el denominador común es que todos son básicamente expresados como diversos coeficientes de correlación. En el caso específico del coeficiente de confiabilidad vinculado a la homogeneidad o consistencia interna, se dispone del coeficiente (Alpha), propuesto por Lee J. Cronbach (1916-2001) en el año 1951 (Quero-Virla, 2010).

En este estudio, se utilizó el coeficiente Alfa de Cronbach para evaluar la fiabilidad interna del cuestionario. Esta medida es crucial para determinar el grado de consistencia entre las diferentes preguntas de la encuesta, garantizando que las respuestas obtenidas reflejen adecuadamente las variables que se pretenden medir. Al aplicar el Alfa de Cronbach, se logró validar estadísticamente la herramienta, asegurando que el cuestionario posea una estructura sólida y que los resultados derivados de su aplicación sean confiables para el análisis posterior.
Como se observa en la fórmula del Alpha (2), el coeficiente depende de tres parámetros: la varianza total de la prueba, la suma de las varianzas de cada ítem y el número de ítems (Canu, 2017)

$$\sigma = \frac{k}{k-1}[1 - \frac{\sum Vi}{Vt}]$$

$K$: $numero\ de\ ítems$
$Vi$: $varianza\ de\ cada\ ítem$
$Vt$: $varianza\ de\ la\ suma\ de\ todos\ los\ ítems$

El alfa de Cronbach va de 0 a 1. Mayor fiabilidad cuando se acerca a 1, menor fiabilidad o consistencia cuando se acerca a cero. Cuando tiende a cero indica que no hay ninguna correlación entre los elementos. Son totalmente independientes. Es decir, conocer el valor de una respuesta a una pregunta no proporciona información sobre las respuestas a las otras preguntas. Cuando tiende a 1 indica que están perfectamente correlacionados. Conocer el valor de una respuesta proporciona información completa sobre los demás elementos. Los analistas utilizan con frecuencia 0,7 como valor de referencia para el alfa de Cronbach. En este nivel y superiores, los ítems son suficientemente consistentes para indicar que la medida es confiable (GPL Research, 2023)

A través de la herramienta Excel se desarrolló todo el proceso para conocer esta medida. En primer lugar, se descargó los datos originales entregados por el instrumento en Google Forms (hoja de respuestas de las 10 tiendas pertenecientes a la prueba piloto), después se hizo un análisis inicial donde se realizó la codificación según el tipo de opciones de respuesta, se subdividieron las preguntas en donde se podía escoger más de una respuesta, así como el tipo matriciales con respuesta múltiple por fila. Para esta codificación es importante mencionar que las preguntas generales como nombre de la tienda, dirección, barrio, estrato, entre otros no se tuvieron en cuenta en la codificación porque eran respuestas individuales para cada tienda y no se podían codificar dentro de un rango estándar.

Debido a la forma como se ampliaron las respuestas, especialmente las que permitían escoger para una misma pregunta varias opciones, se obtuvo un total de 632 ítems a analizar, cada uno de los cuales se etiquetó en su respectiva columna. Además, se optó por mantener en las hojas de análisis preliminar su relación con la pregunta en texto, lo respondido en el instrumento y la codificación (en cada columna del ítem), así como resaltar (en color distintivo) las preguntas que se desglosaban en diferentes alternativas, y las que no se tendrían en cuenta de las generales; esto facilitó el proceso subsecuente, donde en otra hoja se obtuvo la base para el cálculo del Alfa de Cronbach, para lo cual se eliminaron las columnas resaltadas y se mantuvieron las numeraciones (etiquetas) con saltos para relacionarla con las hojas de análisis anteriormente mencionadas, las preguntas originales y su codificación.

En una última hoja se realizó el cálculo del Alfa de Cronbach, para lo cual se eliminaron las preguntas y las respuestas originales y únicamente se mantuvo la etiqueta, que mostraba el número de ítem (asignado inicialmente) y la codificación.

En esta hoja se calcularon el K, que corresponde al número de preguntas 272, también se calculó la varianza de cada pregunta, para las 48 tiendas encuestadas en la prueba piloto y se realizó la sumatoria para calcular el Vi, el cual arrojó un valor de 482,0212 y por último se sumaron las respuestas codificadas por cada encuestado y para ese resultado se calculó su varianza, lo que equivale a Vt, el cual arrojó un valor de 1701,395 Se aplicó la fórmula  y arrojó un valor de $\propto$ de 0,71933 lo que significa un nivel aceptable de consistencia del 71, 93%.

### 4.3 Diseño final

La encuesta final fue organizada en cinco secciones, basadas en los procesos logísticos establecidos en la Fase 1 de esta investigación y en la incorporación de uno nuevo recomendado por UNDECO en la validación previa: Preguntas generales, abastecimiento, inventarios, almacenamiento y tecnología. Cada sección fue diseñada para explorar de manera específica los aspectos clave relacionados con la gestión de las tiendas en la localidad Suroriente. Esta estructura garantizó que el cuestionario abordara detalladamente cada uno de los aspectos logísticos identificados, proporcionando una visión integral y clara sobre los temas de interés. A continuación, se desarrolla cada sección del cuestionario y se da una visualización general y resumida de las preguntas realizadas en cada parte.

Es relevante aclarar que algunas de las preguntas fueron realizadas según cada subcategoría de productos definidas previamente en la Tabla 2, esto con la finalidad de poder realizar un análisis más detallado y poder identificar el comportamiento del tendero según cada subcategoría.

Tabla 2. Estandarización logística de abastecimiento de tiendas de barrio de la localidad de riomar.

| Subcategoría | Proveedor frecuente | Medio de pedido | Frecuencia de pedido |
|---|---|---|---|
| Abarrotes | Distribuidor / Mayorista | Directo / Llamada | 2 veces por semana |
| Bebidas | Distribuidor / Mayorista | Llamada / Directo | 2 veces por semana |
| Lácteos | Empresa directa (preventa) | Preventista / Directo | 2 veces por semana |
| Cuidado personal | Distribuidor | Llamada | 1 o 2 veces por semana |
| Frutas y verduras | Mayorista / Local directo | Directo / Llamada | 2 a 3 veces por semana |
| Carnes sin procesar | Mayorista / Distribuidor | Directo | 2 veces por semana |
| **Subcategoría** | **Tiempo de entrega** | **Gestión de cantidades** | **Criterio para definir cantidad** |
| Abarrotes | 24 horas | Autónoma | Ventas anteriores / Espacio disponible |
| Bebidas | 24 horas | Autónoma | Ventas anteriores / Posibilidad económica |
| Lácteos | 24 horas | Combinada (asistida+autónoma) | Ventas anteriores / Estimación demanda futura |
| Cuidado personal | 24 - 48 horas | Autónoma | Estimación demanda / Ventas anteriores |
| Frutas y verduras | Inmediata | Autónoma | Rotación / Perecibilidad / Demanda esperada |
| Carnes sin procesar | 24 - 48 horas | Autónoma | Ventas anteriores / Estimación / Refrigeración |

Fuente. Elaboración propia.

### 4.3.1 Sección generales.

La primera sección del formulario tenía como objetivo la caracterización de la población. En la cual se buscaba conocer algunas características generales de la tienda, como el estrato social, la antigüedad, horarios de atención, tipo de establecimiento, entre otras.

### 4.3.2 Sección abastecimiento.

Esta sección del cuestionario se enfocó en entender los procesos y prácticas relacionadas con la adquisición de productos por parte de los tenderos. Las preguntas en esta sección tenían como objetivo identificar las fuentes de abastecimiento, la frecuencia de los pedidos, los principales proveedores y los desafíos que enfrentan los tenderos en este proceso. Además, se indagó sobre la planificación de los pedidos y los factores que influyen en la selección de los productos a adquirir.

### 4.3.3 Sección inventario.

El objetivo de esta sección fue profundizar en las prácticas de los tenderos respecto al control y manejo de sus existencias, con especial énfasis en cómo gestionaban sus niveles de inventario y prevenían el agotamiento de productos. Se buscaba comprender qué categorías de productos consideraban más relevantes y cómo estas preferencias influían en sus decisiones en el inventario. Además, se indagó sobre el manejo de las reservas de productos y los factores que contribuían al desabastecimiento, con el fin de identificar posibles ineficiencias o desafíos en la gestión del inventario. La Tabla 3 resume las preguntas realizadas en esta sección.

Tabla 3. Estandarización de estrategias de inventario y abastecimiento

| Subcategoría | Volumen de ventas | Frecuencia de abastecimiento | Método de registro |
|---|---|---|---|
| **Abarrotes** | Alto | 2 veces por semana | Manual / observación |
| **Bebidas** | Alto | 2 veces por semana | Manual / parcial |
| **Lácteos** | Medio-Alto | 2 veces por semana | Manual / con apoyo del proveedor |
| **Cuidado personal** | Medio | 1-2 veces por semana | Parcial / visual |
| **Frutas y verduras** | Variable | 2-3 veces por semana | Visual directa |
| **Carnes sin procesar** | Medio | 2 veces por semana | Manual / directa |
| **Subcategoría** | **Criterio de reposición** | **Causas comunes de desabastecimiento** | **Estrategias de corrección** |
| **Abarrotes** | Ventas anteriores | Alta rotación / baja planificación | Incrementar frecuencia pedidos |
| **Bebidas** | Posibilidad económica / ventas | Errores en cantidades pedidas | Aumentar marcas disponibles |
| **Lácteos** | Estimación demanda futura | Retraso de proveedor | Mejorar control físico |
| **Cuidado personal** | Espacio disponible / percepción | Demanda impredecible | Revisar proveedor |
| **Frutas y verduras** | Rotación / perecibilidad | Perecibilidad / mal cálculo | Rotación anticipada / descuentos |
| **Carnes sin procesar** | Demanda esperada / refrigeración | Entrega incompleta / vencimientos | Intercambio o reposición inmediata |

Fuente. Elaboración propia.

### 4.3.4 sección almacenamiento.

Esta sección se centró en examinar cómo los tenderos gestionan el espacio físico disponible para almacenar sus productos, un aspecto fundamental para la operatividad de las tiendas. Se investigaron temas como la capacidad de almacenamiento, la organización y disposición de los productos dentro del espacio disponible, además se indagó sobre las técnicas para vender para evitar la pérdida de los productos, y así mismo, cuál era el principal motivo por el cual se presentaban pérdidas en la tienda. El análisis de estos factores permitió obtener una visión más amplia de los retos que enfrentan los tenderos en cuanto al almacenamiento de sus productos y que estrategias usar para evitar pérdidas. La Tabla 4 resume las preguntas realizadas en esta sección.

Tabla 4. Estandarización de gestión de productos

| Aspecto evaluado | Práctica dominante | Observación adicional |
|---|---|---|
| **Organización en estantería** | Por tipo de producto o frecuencia de salida | Organización empírica, sin categorización codificada |
| **Control de productos vencidos** | Revisión visual eventual / no sistemática | Falta de registro sistemático o control digital |
| **Frecuencia de revisión del inventario** | Semanal o quincenal (mayoría); algunos diarios | Alta dependencia del criterio del tendero |
| **Método de rotación** | FIFO informal (basado en antigüedad visual) | No existe rotación formal establecida |
| **Problemas frecuentes** | Producto vencido, averiado o entregado erróneamente | Afecta percepción de satisfacción y confianza |
| **Estrategia ante producto vencido** | Intercambio o descuento ocasional | Falta de estrategia clara en tiendas nuevas |
| **Medidas frente a devoluciones** | Devolución directa o reclamo con siguiente pedido | Depende del proveedor; algunos rechazan devoluciones |
| **Soporte del proveedor** | Moderado; más frecuente en empresas que en mayoristas | Empresas ofrecen más soluciones que mayoristas o informales |

Fuente. Elaboración propia.

### 4.3.5 Sección tecnología.

En esta última temática, las preguntas se enfocaron en identificar el uso de herramientas tecnológicas para la gestión de las tiendas. Se incluyeron preguntas sobre el uso de sistemas tecnológicos de puntos de venta, sistemas de software de gestión de inventarios, y el manejo de información en la tienda. Esta sección también exploró la percepción de los tenderos sobre la tecnología, su disposición para adoptarla en el futuro y cuáles eran los factores que influencian su decisión. La Tabla 5 resume las preguntas realizadas en esta sección.

Tabla 5. Estandarización tecnológica de las tiendas

| Dimensión evaluada | Resultado dominante | Observaciones adicionales |
|---|---|---|
| **Sistema de ventas actual** | Papel y lápiz / No cuenta con sistema | Baja penetración de software de gestión |
| **Gestión de información de clientes** | No almacenan datos / Memoria o papel | No se utiliza CRM ni base digitalizada |
| **Percepción sobre uso de tecnologías** | Positiva, pero con reservas en operatividad | Reconocen ventajas pero temen dificultades |
| **Barreras principales** | Falta de conocimiento, miedo a fallos, costos | Tienden a percibir la tecnología como compleja |
| **Proyección de implementación tecnológica** | Mediano plazo (1-2 años); pocos en corto plazo | Disposición existe, pero sin hoja de ruta clara |

Fuente. Elaboración propia.

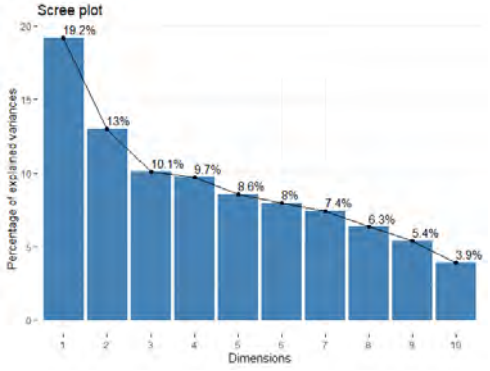
El diseño final del cuestionario (ver Anexo 1) permitió una exploración detallada y estructurada de los principales procesos logísticos en la gestión de las tiendas del sector Riomar. al organizar las preguntas en secciones bien definidas, se garantizó la obtención de información relevante en cada área, facilitando una visión integral de las prácticas de los tenderos. Este enfoque sistemático no solo aseguró la coherencia entre los objetivos de la investigación y las preguntas formuladas, sino que también optimizó la claridad y efectividad del instrumento para capturar datos que servirán de base para el análisis próximo y recomendaciones estratégicas.

Anexo 1. Estructura y objetivos del instrumento de recolección de información.

| Sección | Definición | Objetivo |
|---|---|---|
| 1 | Generales | Su objetivo es determinar las características inherentes de la población encuestada para identificar los elementos demográficos principales y comprender el perfil general de las tiendas, incluyendo su tamaño, ubicación y tipo de atención que ofrecen. |
| 2 | Abastecimiento | Intenta evaluar los procedimientos y criterios utilizados para el abastecimiento de productos, así como la selección de proveedores, su tiempo de suministro, la frecuencia de pedidos, y los factores clave al elegir los artículos a vender en el punto de venta. |
| 3 | Inventario | Busca identificar los criterios que utiliza la tienda para definir las existencias necesarias, así como los aspectos más importantes relacionados, como las estrategias para hacer frente a la situación de agotados, entre otros. |
| 4 | Almacenamiento | Pretende examinar los factores que considera la tienda al decidir cómo organizar los productos en la exhibición y conservación de los productos en la tienda. |

## 5. RESULTADOS.

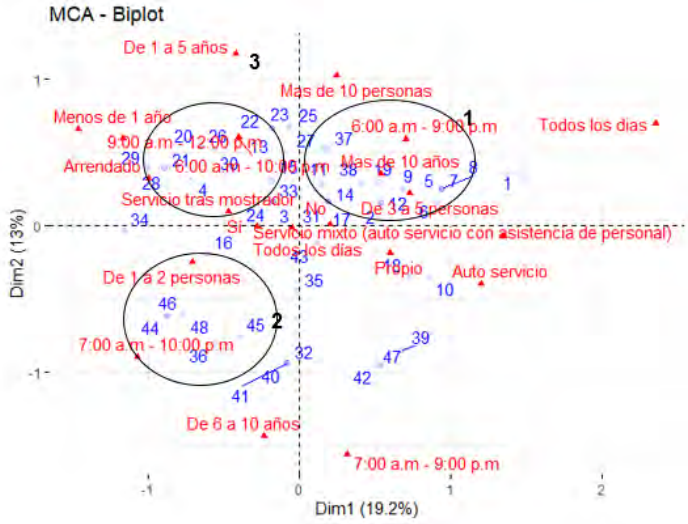
Grafico 1. Explicación de la varianza en todas las dimensiones de sus variables.




Fuente. Elaboración propia.

para iniciar el análisis multivariable se presenta el gráfico de sedimentación de scree plot, el cual muestra el porcentaje de varianza explicada por cada una de las dimensiones obtenidas tras la aplicación del análisis de componentes principales, en este gráfico se puede observar que la primera dimensión explica el 19.2% de la varianza, mientras que la segunda dimensión explica el 13%, sumando conjuntamente un 32.2% de la varianza total del conjunto de datos.

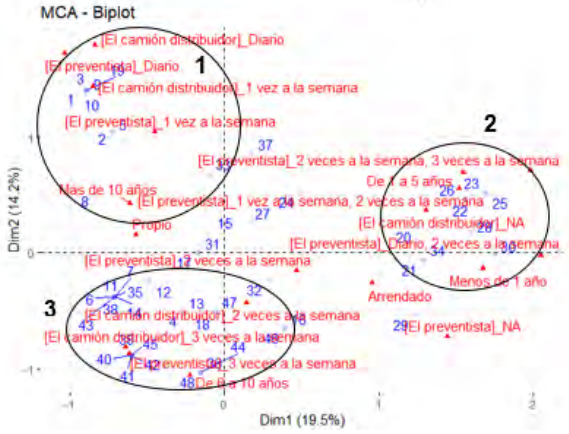
Grafico 2. Caracterización general de las tiendas.




Fuente. Elaboración propia.

En el análisis multivariable se identificaron tres agrupaciones claras, la Elipse 1 reúne tiendas con más de 10 años y mayor número de empleados, reflejando consolidación operativa, la Elipse 2 agrupa negocios pequeños, de 1 a 2 personas, con atención personalizada y horarios amplios, la Elipse 3 corresponde a tiendas nuevas, con estructuras livianas y recursos limitados, que operan de forma más conservadora en su fase inicial.

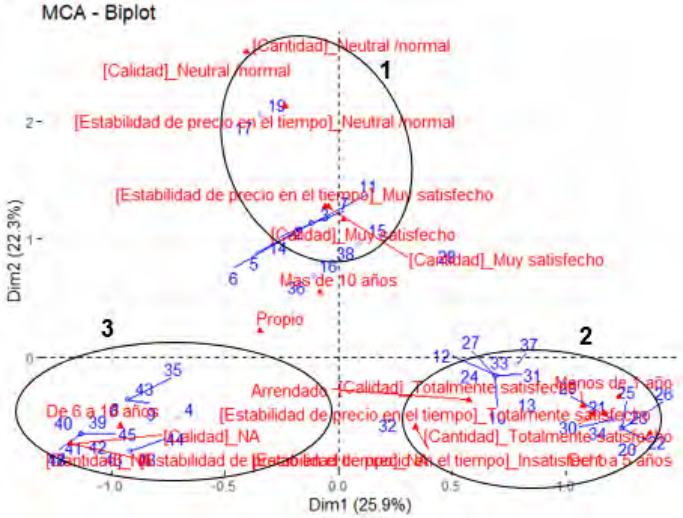
Grafico 3. Frecuencia en que visitan el camión distribuidor a las tiendas.




Fuente. Elaboración propia.

El biplot muestra que las tiendas con más de 10 años y locales propios reciben visitas diarias y estables de proveedores, las tiendas nuevas y arrendadas presentan frecuencias variables, reflejando esquemas logísticos en desarrollo. Las de 6 a 10 años mantienen una frecuencia intermedia, equilibrando reposición y costos.

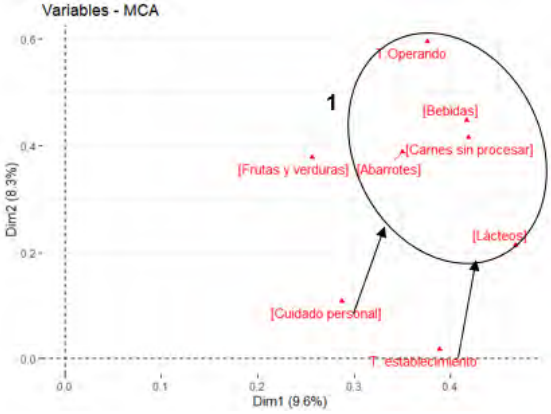
Grafico 4. nivel de satisfacción en cuanto al cumplimiento de los proveedores tipo mayorista.




Fuente. Elaboración propia.

El análisis evidenció que las tiendas con más de 10 años y locales propios presentan satisfacción moderada y estable con sus proveedores, las tiendas nuevas muestran percepciones polarizadas, desde muy satisfechas hasta insatisfechas. En los locales arrendados, la satisfacción es más variable, influida por la falta de estabilidad estructural.

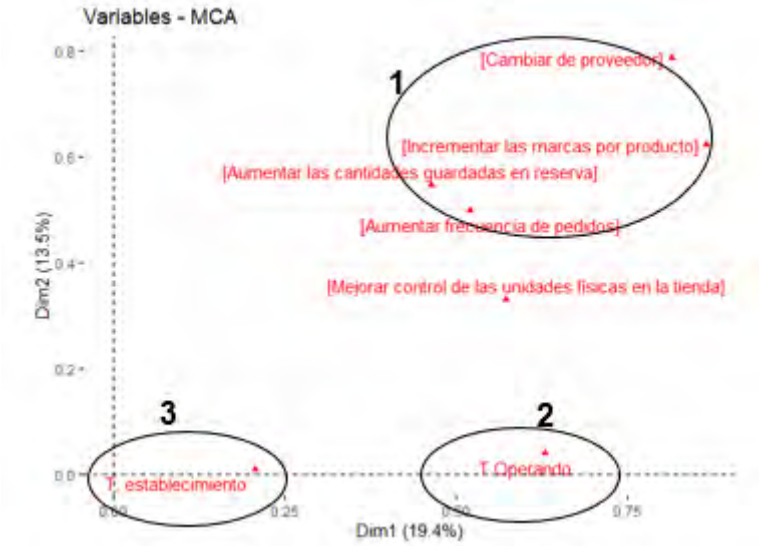
Grafico 5. Análisis de correspondencia de las 5 subcategorías más importantes para su tienda




Fuente. Elaboración propia.

El análisis de correspondencias múltiples mostró que las subcategorías bebidas, carnes, abarrotes y lácteos se asocian con tiendas de mayor antigüedad, reflejando su importancia estratégica, la condición del local (propio o arrendado) tuvo baja influencia en la valoración de productos, la subcategoría cuidado personal presentó una relación más dispersa, vinculada a enfoques comerciales específicos.

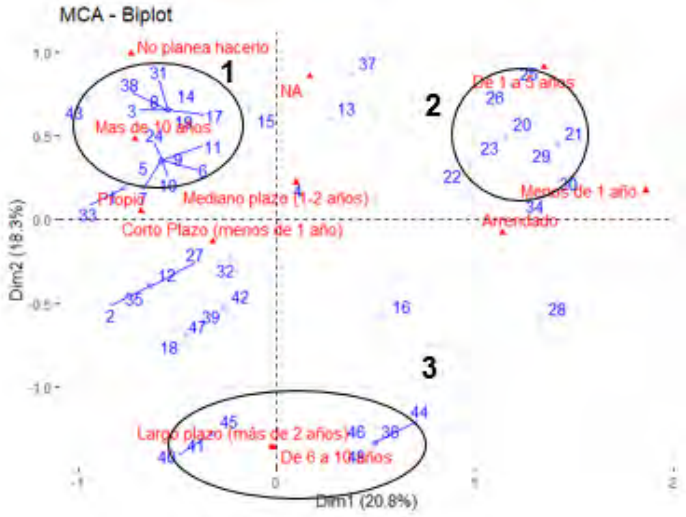
Grafico 6. Análisis de correspondencia múltiple para la frecuencia utiliza la estrategia de Aumentar las cantidades guardadas en reserva para que la situación de agotados no se presente




Fuente. Elaboración propia.

El análisis de correspondencias múltiples reveló tres agrupaciones principales, la Elipse 1 concentró estrategias activas de abastecimiento, como cambiar proveedores o aumentar reservas, reflejando gestión anticipada, en contraste, tipo de establecimiento y antigüedad (Elipses 2 y 3) mostraron poca relación con las decisiones de inventario, indicando que la prevención del desabastecimiento depende más de la gestión operativa que de factores estructurales.

Grafico 7. En cuánto tiempo realizaría la implementación de un sistema tecnológico.




Fuente. Elaboración propia.

El análisis de correspondencias múltiples mostró que las tiendas con más de 10 años y locales propios presentan resistencia o poca urgencia para adoptar tecnología, las tiendas nuevas y arrendadas aún no definen plazos claros de implementación, reflejando incertidumbre o limitaciones de recursos, en cambio, los negocios de 6 a 10 años proyectan la adopción tecnológica a largo plazo, evidenciando una visión más estratégica y planificada.

## 6. CONCLUSIONES.

Las tiendas de barrio en Riomar especialmente aquellas con más de 10 años comercializando tienden a operar con horarios extensos (6:00 a.m. a 9:00/10:00 p.m.) y en locales propios, lo que refleja su estabilidad y experiencia, como también el conocimiento del comportamiento de los clientes, además, las tiendas más nuevas muestran horarios variables y operan en locales arrendados lo que indica que están en ese proceso de exploración y adaptación, por otro lado la mayoría de las tiendas, independientemente de su antigüedad, operan con equipos pequeños (1-5 personas), aunque las tiendas más antiguas suelen emplear más personal (3-5 personas), lo que está ligado a su consolidación en el mercado lo ya dicho con anterioridad ,no obstante, la tecnología no avanzado de manera considerable, solo han adoptado los métodos de pago de plataformas digitales como Nequi y Daviplata, aunque el efectivo sigue siendo predominante, adicionalmente las tiendas ofrecen un portafolio diversificado donde con el 46% de las respuestas se demostró que las tiendas ofrecen más de siete marcas por tipo de subcategoría, lo cual es crucial para la cumplir los requerimos y fidelización del cliente, también, para completar este análisis en el comportamiento o tendencias de estos tipos de negocios , se logró identificar patrones específicos para una segmentación natural en función de variables como ubicación geográfica, tipo de productos ofertados, nivel de abastecimiento y frecuencia de compras, confirmando que no existe un único perfil de tienda, sino una diversidad estructural que obedece a factores contextuales y sociales propios de cada zona.

El análisis de las características estructurales y operativas de las tiendas de barrio en Riomar de la ciudad de barranquilla se evidenció que, aunque existe una heterogeneidad en cuanto al tiempo de operación y modelo de establecimiento sea propio o arrendado, se mantienen patrones homogéneos en aspectos como la amplitud de horarios, la atención personalizada y la oferta mixta de productos de consumo básico, se observó que la mayoría de negocios conservó esquemas de operación familiares y dependió de un número reducido de trabajadores, lo que implica una estructura flexible pero vulnerable ante picos de demanda o ausencias imprevistas, Lo que indica estas condiciones, sumadas a la prevalencia de métodos de pago en efectivo y una baja adopción de herramientas digitales, reflejaron un perfil tradicional que, si bien es coherente con la cultura comercial barrial, limita la competitividad frente a formatos más tecnificados.

En el estudio del eslabón de abastecimiento, se identificó una marcada preferencia por proveedores de cercanía y canales de pedido directos, lo que permite reducir tiempos de entrega y adaptarse a la rotación rápida de ciertos productos, sin embargo, esta misma dependencia del suministro frecuente y en pequeñas cantidades incrementa la exposición a desabastecimientos temporales, especialmente en productos de alta demanda estacional, la frecuencia de reposición y la informalidad en la planificación reflejaron una gestión reactiva, ajustada al flujo de caja diario, lo cual, aunque funcional para minimizar excedentes, limita la posibilidad de obtener economías de escala o beneficios comerciales más favorables a la tiendas pertenecientes a la localidad de Riomar. este patrón es característico de las dinámicas logísticas del canal tradicional, donde la inmediatez prima sobre la anticipación estratégica.

La investigación mostro que en aspectos comercial entre tenderos y proveedores en las tiendas de Riomar de la ciudad de barranquilla mostró una fuerte valoración de atributos como la estabilidad de precios, el cumplimiento en la entrega y la flexibilidad en condiciones de pago, los proveedores empresariales fueron percibidos como más confiables en términos de marca y continuidad de suministro, mientras que los distribuidores y mayoristas ofrecieron ventajas en cercanía y adaptabilidad. Sin embargo, la dependencia de pocos proveedores clave genera un riesgo de concentración que podría afectar la resiliencia de la cadena, además la lealtad comercial se sustentó más en la reciprocidad y en beneficios inmediatos que en acuerdos formales, lo que plantea un reto para estandarizar relaciones que garanticen seguridad de abastecimiento a largo plazo como lo puede ser un contrato de por medio.

En el estudio del eslabón de la gestión de inventario en las tiendas de Riomar se caracterizó por un control mayoritariamente manual y empírico, con reposiciones determinadas por observación directa y no por proyecciones basadas en datos históricos, lo cual generó una respuesta más reactiva que preventiva frente a desabastecimientos, donde la acción más común fue incrementar la frecuencia de pedidos en lugar de fortalecer la planificación de pedidos, las limitaciones de espacio y recursos

financieros condicionaron la capacidad de almacenamiento y por eso se toma la decisiones de la alta rotación, pero también incrementando la vulnerabilidad ante variaciones en la oferta, este escenario evidenció la necesidad de establecer estándares mínimos de control, registro y planificación que permitan optimizar la disponibilidad de productos sin generar sobrecostos.

En la administración interna de productos que las tiendas de Riomar mostraron un predominio de prácticas basadas en la experiencia y el orden visual, aplicando estrategias como la organización por características físicas y un uso no formalizado del criterio FIFO, además que las devoluciones y las pérdidas por vencimiento se gestionaron de forma puntual, generalmente devolviendo el producto al proveedor sin ningún inconveniente, sin atacar de fondo las causas estructurales, la baja planificación ante fechas de vencimiento y la limitada prevención de mermas revelaron una oportunidad de mejora para la implementación de protocolos estandarizados de rotación, control y manejo preventivo de deterioros, es decir si se adoptan estas mejoras, el canal tradicional podría reducir pérdidas y mejorar su competitividad frente a formatos de tiendas de descuento.

En el análisis multivariado nos encontramos con patrones de conductas de las tiendas donde podemos se pudo partir de esa información para determinar aquellos estándares de desempeño, comenzando con que las tiendas consolidadas manejan menos marcas, pero más reconocidas, mientras que las nuevas buscan diferenciarse con una oferta más amplia, esto define que estos comercios deben manejar más de 3 marcas por tipo de categoría, por otro lado, se evidencio que los locales que tienen más de 10 años en el mercado presentan patrones de abastecimiento diario o varias veces por semana, mientras que los nuevos establecimientos tienen una frecuencia más baja o irregular, lo cual sugiere que la medida de entrega de pedidos semanales sea mayor de dos veces por semana, además, tenemos que las tiendas más antiguas donde son propietario tienden a reportar mayor satisfacción, lo cual se relaciona con tiempos de entrega estables, calidad del producto y precios constantes, para esto se considera que de 1 a 5 la calificación estándar es 4, es decir el 80% de satisfacción.

Las tiendas de barrio enfrentan amenazas comerciales considerables, es decir, la competencia de las tiendas de descuento duro(D1,Ara, Isimo) es una preocupación creciente, no obstante, por el hecho de que solo el 31% de las tiendas de barrio ofrecen promociones o descuentos, esto ha resultado en que muchos tenderos perciban directamente el impacto negativo en sus ventas diarias, aunque una parte considerable (48%) se considera inmune a esta competencia, lo cual podría ser una percepción errónea ya que estos formatos de tiendas que han llegado a los barrios tradicionales para consolidarse, además que los resultados sugieren una fuerte correlación entre el entorno socioeconómico de los consumidores y las decisiones operativas de las tiendas, en aspectos como en lo relación con la rotación de inventarios, el tipo de proveedores y el volumen de ventas, lo cual implica que los tenderos adaptan sus prácticas comerciales a las características del mercado local

En términos logísticos, los tenderos prefieren realizar pedidos directamente o mediante llamadas con sus proveedores, específicamente para subcategoría como lácteos y abarrotes, además, con una frecuencia de visitas promedio de proveedores de dos o tres veces por semana, por otro lado, los tenderos tienen una autonomía en la definición de cantidades a pedir para su inventario, su autonomía es basada principalmente en ventas anteriores (27%) y estimaciones futuras (18%) de los registros de respuestas, también se pudo identificar que los distribuidores preventa son los proveedores preferidos para lácteos y abarrotes, las cuales son insumos que se caracterizan por ser de muchas marcas y estos van llegando a las tiendas para ofrecer sus precios y preferencias, mientras que los mayoristas son importantes para frutas y verduras ya que estos están ubicados en el centro de mercado en la ciudad de barranquilla, además la frecuencia de reposición más común de estas subcategorías es dos veces por semana para así evitar pérdidas por deterioro ya que estos tienen una vida útil bastante corta, complementando que uno de los factores que más impactan en la sostenibilidad de las tiendas de barrio es la confianza establecida entre tendero y cliente y esa confianza que se crea va más allá de los márgenes de rentabilidad o del acceso a productos de bajo costo, lo cual refuerza la importancia del capital social como variable estratégica para el funcionamiento del canal tradicional.

Para la caracterización de los aspectos logísticos en las tiendas de barrio se identificó una muy baja sistematización de los procesos de control y manejo de inventario, esto se evidencio especialmente en tiendas arrendadas y con menos de cinco años en el mercado, lo que limita la capacidad de reacción ante agotados, vencimientos o deterioro de productos, por otro lado, las tiendas más establecidas es decir que tienen más de 10 años comercializando tendieron a mostrar menor intención de cambiar su modelo operativo haciéndose rígidos al cambio, mientras que estos modelos de negoción que están en su etapa crecimiento mostraron mayor disposición a la planificación y adopción de tecnologías, pero enfrentan barreras en su implementación por falta de recursos o conocimiento, por ende, se evidenciaron una variabilidad en la forma de registrar y controlar los productos, las cuales en su mayoría las tiendas aún utilizan métodos manuales o de observación directa, lo que limita la eficiencia y la trazabilidad, especialmente en contextos de alta rotación o perecederos.

### 6.1. RECOMENDACIONES

Para mejorar la competitividad y sostenibilidad en el mercado para las tiendas de barrio en el sector de Riomar, se recomienda que las tiendas implementen promociones periódicas y amplíen su portafolio de productos según las necesidades locales, es decir tener presente aquellos artículos que los clientes necesitan y no están en el portafolio, también es crucial fortalecer la logística interna a través de herramientas digitales para la gestión de inventarios y pedidos, o por lo menos un registros donde se puedan identificar las cantidades disponibles, y así dar causalidad a cualquier novedad que se presente, también establecer alianzas con proveedores para asegurar mejores condiciones sobre las políticas de devoluciones minimizando perdida especialmente para aquellas tiendas que llevan menos de dos años en el mercado, otro factor a recomendar es capacitar a los tenderos en gestión logística básica y en el uso de plataformas digitales, estandarizar los procesos operativos para así definir las actividades que repercuten en diario vivir del negocio y no caer en incertidumbre ante cualquier anomalía en los procesos.

Dado que las tiendas de barrio presentan comportamientos diferenciados, se recomienda a entidades gubernamentales y actores de la cadena de suministro diseñar programas adaptados a las realidades locales, priorizando el acompañamiento técnico, la digitalización básica y la gestión del inventario en función del tipo de tienda, para así impulsar estos tipos de negocios a un crecimiento funcional y que perduren en el tiempo, donde estos pueden ser las fuentes de futuros empleos.

Se sugiere que las tiendas más nuevas adopten horarios estables y amplios, similares a los de los comercios consolidados, ya que esto no solo mejora la percepción del cliente, sino que también contribuye al posicionamiento y a la construcción de hábitos de compras, asimismo, conforme estos negocios avancen en su ciclo de vida, es importante que consideren la expansión paulatina de su equipo de trabajo, pasando de operaciones unipersonales a grupos de 3 a 5 colaboradores, lo que permitiría una mejor atención al cliente y mayor capacidad operativa como respuestas hacia las circunstancias diarias.

Por otro lado, al uso de tecnología, aunque se ha identificado una adopción incipiente de métodos de pago digitales como Nequi y Daviplata, persiste una baja sistematización en los procesos de control e inventario, por eso es recomendado transportarse a la digitalización progresiva de las tiendas como lo puede ser el uso de herramientas tecnológicas accesibles, como aplicaciones móviles gratuitas o sistemas básicos en Excel, que les permitan tener un mayor control sobre el stock, reducir pérdidas por vencimiento y mejorar la trazabilidad, especialmente en categorías de alta rotación, como se ha comentado con anterioridad.

Finalmente, frente al crecimiento de las tiendas de descuento duro como D1, Ara e Isimo, es fundamental que las tiendas de barrio desarrollen estrategias de diferenciación centradas en su proximidad con el cliente, esto incluye implementar promociones sencillas, ofrecer combos o descuentos ocasionales, también se debe aprovechar el valor del capital social, es decir, la relación de confianza construida con los clientes a lo largo del tiempo, este es el activo estratégico que va más allá del precio o la variedad de productos, su mayor valor agregado.

## 7. REFERENCIAS.


- Campos Portugal, P. A. (2023). La administración de la cadena de suministro y su importancia en las empresas, como parte de la estrategia en los nuevos modelos de negocios. . Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(3), 7203-7219.
- Canu, M. D. (2017). Active learning session based on didactical engineering framework for conceptual change in students' equilibrium and stability understanding. In M. D. Canu, Active learning session based on didactical engineering framework for conceptual change in students' equilibrium and stability understanding (pp. 32-44.). European Journal of Engineering Education, 42(1).
- Castellanos Hurtado, N. C. (2008). DESCRIPCIÓN DE LA CADENA DE ABASTECIMIENTO DE LA TIENDA TRADICIONAL DE BARRIO MANIZALEÑA. Manizales: Universidad de Manizales.
- GPL Research. (2023). Alfa de Cronbach: Qué es y cómo interpretarlo.
- Meneses Bucheli, K., Anda León, D., & Segura Ruíz, O. (2017). Pequeñas Tiendas de Barrio. Teuken Bidikay, 51-72.
- Quero-Virla, M. E. (2010). Confiabilidad y coeficiente Alpha de Cronbach. TELOS. Revista de Estuidos Interdiciplinarios en Ciencias Sociales.

# ESTRATEGIAS DE SOLUCIONES LOGÍSTICAS DE ÚLTIMA MILLA PARA LA DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS FRESCOS FRUTIHORTÍCOLAS

Berardi, María Betina; Onaine, Adolfo

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.*
*bberardi@fi.mdp.edu; aeonaine@fi.mdp.edu.ar*

**RESUMEN**

La logística de última milla, impulsada por el crecimiento del comercio electrónico y los cambios en los hábitos de consumo, se ha consolidado como un objetivo estratégico para las organizaciones. En este contexto, la distribución final de productos frutihortícolas representa un desafío particular, ya que exige rapidez en los envíos, control riguroso de variables como la temperatura y una gestión eficiente que garantice la conservación de la calidad. La revisión bibliográfica y tecnológica realizada permitió identificar las principales estrategias emergentes aplicables a este sector: vehículos autónomos y eléctricos que reducen costos y emisiones, *lockers* inteligentes que aseguran accesibilidad y disminuyen fallas de entrega, plataformas digitales de optimización de rutas que mejoran la eficiencia operativa, e IoT con sensores y *blockchai*n para reforzar la trazabilidad y preservar la frescura. El análisis de estas herramientas, a través de indicadores de eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y calidad del servicio, evidenció su potencial para transformar la distribución de productos frescos en entornos urbanos. Los resultados destacan que la integración de dichas tecnologías contribuye a reducir pérdidas, mejorar la experiencia del consumidor y avanzar hacia modelos logísticos más sostenibles. Este trabajo aporta lineamientos estratégicos que orientan a organizaciones y PyMEs hacia la innovación y la viabilidad técnica en la última milla frutihortícola.

**Palabras Claves:** última milla; logística; productos frutihortícolas, soluciones tecnológicas

**ABSTRACT**

Last-mile logistics, driven by the growth of e-commerce and changing consumer habits, has established itself as a strategic objective for organizations. In this context, the final distribution of fruit and vegetable products represents a particular challenge, as it requires rapid shipments, rigorous control of variables such as temperature, and efficient management that guarantees quality. The literature and technology review identified the main emerging strategies applicable to this sector: autonomous and electric vehicles that reduce costs and emissions; smart lockers that ensure accessibility and reduce delivery errors; digital route optimization platforms that improve operational efficiency; and IoT with sensors and blockchain to strengthen traceability and preserve freshness. The analysis of these tools, through indicators of operational efficiency, environmental sustainability, and service quality, demonstrated their potential to transform the distribution of fresh produce in urban environments. The results highlight that the integration of these technologies contributes to reducing losses, improving the consumer experience, and moving toward more sustainable logistics models. This work provides strategic guidelines that guide organizations and SMEs toward innovation and technical viability in the last mile of fruit and vegetable production.

**Keywords:** last mile; logistics; fruit and vegetable products, technological solutions

## 1. INTRODUCCIÓN

El panorama comercial contemporáneo se ha visto profundamente transformado por el crecimiento exponencial del comercio electrónico y la evolución de los hábitos de consumo, que demandan entregas rápidas y personalizadas. (Frau, M. 2022) En este contexto dinámico, la logística de última milla emerge como un eje estratégico para las organizaciones, siendo el eslabón final y crítico en la cadena de suministro que conecta directamente el producto con el consumidor. Su eficiencia no solo impacta la satisfacción del cliente, sino también la rentabilidad y la sostenibilidad empresarial. (Dong, Y., et al., 2023). La digitalización del sector agroalimentario está estrechamente ligada a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, facilitando procesos más eficientes y sostenibles en la cadena de suministro (Sridhar et al., 2023). El uso de Big Data e inteligencia artificial muestra un gran potencial para reducir pérdidas y optimizar procesos en cadenas de suministro alimentarias (Ahmed & Elgalb, 2024).

El desafío se acentúa en el sector frutihortícola, donde la naturaleza perecedera de los productos impone requisitos logísticos específicos y estrictos. (Asimiyu, Z.2024). A diferencia de otros bienes, las frutas y verduras frescas exhiben una alta variabilidad en precio y rendimiento, y su calidad se degrada rápidamente con el tiempo, lo que exige rapidez en los envíos, un control riguroso de la temperatura y una gestión eficiente para garantizar su conservación. (Peinado-Guerrero, M. et al., 2022).

La problemática se complejiza aún más en el entorno urbano, donde la distribución final se enfrenta a obstáculos inherentes como la congestión del tráfico, las restricciones horarias para el transporte y la imperativa necesidad de una trazabilidad completa que asegure la calidad y el origen del producto. Ante estas dificultades, se vuelve indispensable analizar estrategias emergentes y soluciones tecnológicas que permitan superar estos retos y optimizar la entrega de productos frutihortícolas. (Asimiyu, Z.2024). Estudios recientes destacan que la digitalización del transporte de productos perecederos puede apoyarse en gemelos digitales e IoT para anticipar riesgos y mejorar la eficiencia (Falayi et al., 2024). Además, las cadenas de frío en países en desarrollo requieren enfoques integrales que combinen infraestructura y digitalización para reducir pérdidas (Tokala & Mohammed, 2022).

En respuesta a esta necesidad, el objetivo general de este trabajo es examinar el impacto de soluciones tecnológicas aplicadas a la última milla en la distribución urbana de productos frutihortícolas. Para ello, se realizará una revisión bibliográfica y tecnológica con el fin de identificar y clasificar las principales tendencias disponibles, y establecer un marco conceptual que sustente el diseño de modelos logísticos innovadores.

## 2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan los fundamentos conceptuales y antecedentes relevantes que permiten comprender los desafíos de la logística de última milla y las particularidades de la distribución de productos frutihortícolas en entornos urbanos.

### 2.1. Logística de última milla

La logística de última milla se define como el tramo final del proceso de entrega, donde los bienes son transportados desde un centro de distribución o un centro de operaciones centralizado directamente al consumidor final, ya sea en su domicilio o en un punto de recogida. Este segmento es crucial para la satisfacción del cliente y la eficiencia general de la cadena de suministro, aunque a menudo implica altos costos y una considerable complejidad. Históricamente, la entrega de última milla se caracterizaba por métodos tradicionales como el reparto a pie o en bicicleta, centrándose en rutas locales. Sin embargo, la llegada del comercio electrónico a finales de los años 90, impulsada por gigantes como Amazon, transformó drásticamente este panorama, exigiendo una adaptación rápida de los proveedores de logística para satisfacer las crecientes demandas de entregas más rápidas y fiables, incluyendo servicios en el mismo día o al día siguiente. La evolución ha sido marcada por la integración de sistemas de gestión de transporte, herramientas de gestión de flotas y software de optimización logística, que han permitido a las empresas agilizar sus operaciones y mejorar la eficiencia. (Gevaers, R., et al., 2011).

#### 2.1.1. Desafíos logísticos en entornos urbanos

La logística de última milla en entornos urbanos presenta desafíos significativos que impactan directamente la eficiencia y la rentabilidad. La eficiencia de costos es un obstáculo importante, ya que

este segmento representa una parte sustancial de los costos totales de envío, influenciado por factores como los precios del combustible, el mantenimiento de vehículos, los costos laborales y las entregas fallidas. La congestión del tráfico urbano afecta gravemente los tiempos de entrega y los costos operativos, provocando retrasos e ineficiencias en la planificación de rutas en áreas densamente pobladas. Además, la infraestructura deficiente puede complicar aún más las entregas al limitar el acceso a ciertos puntos. La gestión de paquetes pequeños o múltiples paradas dificulta el uso eficiente del espacio en los vehículos de reparto, lo que aumenta los costos y los tiempos de entrega. La seguridad de los paquetes y el riesgo de robo representan una amenaza significativa, lo que lleva a la insatisfacción del cliente y a costos operativos adicionales para las empresas que deben gestionar reemplazos o reembolsos. Finalmente, la necesidad de que el cliente esté presente para la recogida o entrega, especialmente en servicios a domicilio, añade complejidad a la planificación. (Gevaers, R. et al., 2011).

### 2.2. Cadena de suministro de productos frutihortícolas

La gestión de la cadena de suministro de productos frutihortícolas es inherentemente compleja debido a su naturaleza perecedera y a la rápida degradación de la calidad con el tiempo. Estos productos exhiben altos niveles de variabilidad en precio y rendimiento, lo que los distingue de otros productos agroalimentarios con mayor vida útil. Un problema clave es la pérdida de calidad y valor a medida que pasa el tiempo, lo que requiere que los modelos de optimización consideren no solo la cantidad, sino también la degradación de la calidad y tiempos de transporte controlables. (Peinado-Guerrero, M. et al., 2022). La cadena de frío ininterrumpida es esencial para mantener la calidad y seguridad de los productos frescos durante la manipulación, el transporte y el almacenamiento, siendo crucial para el comercio global de perecederos. Las temperaturas elevadas aceleran la pérdida de calidad y la reducción de la vida útil, un deterioro que a menudo no es visible hasta que es demasiado tarde para ajustar la logística. (Su, J. et al., 2014).

#### 2.2.1 Requisitos de calidad y tiempos críticos

Para los productos frutihortícolas, los requisitos de calidad son primordiales y están directamente vinculados a la frescura y la seguridad alimentaria. La gestión de la calidad del producto debe integrarse con la logística para garantizar el rendimiento de la cadena de suministro, incluyendo la prevención de la contaminación y la adulteración. (Ellahi, R. M. et al., 2024). La visibilidad en tiempo real de la información es fundamental para la toma de decisiones, ya que la falta de datos precisos sobre el mercado puede generar incertidumbre para los productores y contribuir al desperdicio de alimentos (Su, J. et al., 2014). La optimización del inventario es clave para reducir los costos de deterioro, lo que implica disminuir el exceso de existencias en minoristas y centros de distribución, suavizar los ciclos de pedido y aumentar la frecuencia de estos. La capacidad de respuesta rápida es esencial para adaptarse a los cambios en la demanda y la oferta, minimizando los tiempos de entrega y preservando la calidad. (Peinado-Guerrero, M. et al., 2022).

### 2.3. Tecnologías emergentes aplicadas a la última milla

En el contexto de la logística moderna, la última milla se ha convertido en un eslabón crítico para garantizar entregas rápidas, seguras y sostenibles. La incorporación de tecnologías emergentes, como los vehículos autónomos y eléctricos, los *lockers* inteligentes, las plataformas digitales para la optimización de rutas y el uso de IoT con sensores para la trazabilidad, representa una transformación significativa en la manera en que las empresas gestionan sus operaciones, mejorando tanto la eficiencia como la experiencia del cliente.

#### 2.3.1. Vehículos autónomos y eléctricos

Los vehículos autónomos y eléctricos están transformando la logística de última milla, ofreciendo soluciones para el transporte seguro y eficiente de mercancías dentro de las comunidades. Modelos de estimación de energía para vehículos eléctricos de última milla muestran la necesidad de integrar factores como topografía, tráfico y estilo de conducción para mejorar la planificación (Snoeck et al., 2024). Empresas como Nuro han desarrollado vehículos eléctricos compactos y diseñados específicamente para la entrega de última milla, con compartimentos con temperatura controlada que

mantienen productos como comestibles, lácteos, comidas y productos frescos en condiciones óptimas durante el tránsito. Estos vehículos, como el modelo R3 de Nuro, son totalmente eléctricos, producen cero emisiones y están optimizados para operaciones de entregas eficientes, fiables y escalables, integrándose sin problemas en entornos urbanos modernos. La incorporación de vehículos eléctricos en las flotas de reparto de última milla es una estrategia creciente para alcanzar objetivos de sostenibilidad, aunque presenta desafíos en la predicción del consumo de energía para la planificación de rutas. (Barrios Estrada, F. 2022).

### 2.3.2. *Lockers* inteligentes

Los *lockers* inteligentes representan una solución innovadora para la entrega de última milla, especialmente en contextos donde la accesibilidad y la discreción son importantes. (Gómez, Á. et al., 2024). Estos casilleros seguros y automatizados permiten el acceso 24/7 a los artículos, lo que es particularmente útil para estudiantes o personas con horarios no tradicionales, ya que pueden recoger sus productos en cualquier momento, incluso fuera del horario comercial habitual. Ofrecen un acceso discreto, lo que ayuda a los usuarios a evitar el estigma o la incomodidad asociados con la recogida en persona. Para productos frescos, los *lockers* inteligentes pueden incluir almacenamiento refrigerado, manteniendo artículos como lácteos, frutas, verduras o comidas preparadas seguros y utilizables. Además, facilitan el seguimiento del inventario, lo que permite a los administradores optimizar el stock y priorizar los artículos próximos a caducar para reducir el desperdicio de alimentos (Pitney Bowes. 2025)

### 2.3.3. Plataformas digitales para optimización de rutas

Las plataformas digitales para optimización de rutas son herramientas cruciales para mejorar la eficiencia en la logística de última milla, especialmente para productos perecederos. Estas plataformas determinan las rutas más eficientes para una flota de vehículos, equilibrando múltiples objetivos y restricciones. Permiten reducir los costos de entrega al aumentar la densidad de las rutas (más paradas por ruta, menos kilómetros recorridos) y minimizar el tiempo de inactividad de los conductores. Para el transporte de productos frescos, estas soluciones son capaces de considerar restricciones específicas de la cadena de frío, asignando pedidos a camiones según las necesidades de control de temperatura y asegurando el cumplimiento de las ventanas de tiempo de entrega de los clientes. La anticipación inteligente del tráfico y el ajuste dinámico de rutas en tiempo real son características clave, permitiendo que las rutas se optimicen continuamente incluso después de que los vehículos hayan partido, integrando eventos imprevistos como clientes ausentes o interrupciones del tráfico. Esto asegura la integridad de la cadena de frío y la adherencia a los compromisos de entrega, lo que puede generar ganancias de productividad de hasta el 15% en comparación con la planificación manual. (West, N. R. B.,2023).

### 2.3.4. IoT, sensores de temperatura y trazabilidad

El Internet de las Cosas (IoT) y los sensores son fundamentales para la visibilidad y el monitoreo en tiempo real en la cadena de suministro de productos frescos. Los dispositivos IoT, que incluyen sensores, GPS y redes inalámbricas, permiten el seguimiento continuo de los productos alimenticios durante el tránsito y el almacenamiento. Los sensores de temperatura y humedad son esenciales para monitorear las condiciones ambientales críticas, detectando desviaciones de los niveles óptimos y permitiendo acciones correctivas antes de que se produzca un deterioro significativo (Asimiyu,Z. 2024). Sensores más avanzados, como las narices electrónicas (*e-Noses*), pueden detectar olores y evaluar la frescura o el deterioro analizando compuestos orgánicos volátiles, mientras que las lenguas electrónicas (*e-Tongues*) analizan composiciones líquidas para simular el gusto humano, utilizadas para probar la frescura y consistencia (Rabehi, A. et al., 2024). La trazabilidad se mejora significativamente con estos sistemas, ya que proporcionan datos en tiempo real sobre el origen, las condiciones de transporte y el estado del producto, lo que es crucial para la seguridad alimentaria y la confianza del consumidor. La tecnología *blockchain* complementa al IoT al proporcionar un registro digital inmutable y transparente de cada transacción, desde la producción hasta la venta minorista, verificando la autenticidad y el origen del producto y previniendo la falsificación (Ellahi, R. M. et al., 2024).

### 2.4. Indicadores clave de análisis

El análisis de desempeño en la última milla requiere la consideración de indicadores clave que permitan evaluar la efectividad de las estrategias implementadas. Entre los más relevantes se encuentran la eficiencia operativa, la sostenibilidad ambiental y la calidad del servicio al cliente.

#### 2.4.1. Eficiencia operativa

La eficiencia operativa en la logística de última milla de productos frutihortícolas se puede medir a través de varios indicadores clave que reflejen la optimización de recursos y procesos. La reducción de costos se logra mediante la optimización de rutas para minimizar el consumo de combustible y los costos laborales, así como la reducción de los costos de mantenimiento de vehículos. La productividad se mejora al aumentar la densidad de las rutas (más paradas por ruta) y reducir los tiempos de inactividad de los conductores (Gevaers, R. et al., 2011). La precisión en la previsión de la demanda es crucial para evitar el exceso de existencias o la falta de productos, lo que impacta directamente en la reducción del desperdicio y los costos de almacenamiento (Asimiyu, Z.,2024). La automatización de procesos en centros de distribución y almacenes, así como la automatización de pedidos, aumentan la productividad y reducen los errores humanos, liberando recursos y disminuyendo los costos. Los tiempos de entrega y la tasa de utilización de camiones son también indicadores fundamentales de la eficiencia operativa (Dong, Y. et al., 2023).

#### 2.4.2. Sostenibilidad ambiental

La sostenibilidad ambiental es un pilar fundamental en la evaluación de las soluciones de última milla para productos frutihortícolas, buscando minimizar el impacto ecológico de las operaciones logísticas (Dong, Y. 2023). La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero se logra mediante la optimización de rutas, lo que disminuye el consumo de combustible y por el uso de vehículos eléctricos que producen cero emisiones. La reducción del desperdicio de alimentos es un indicador crítico, ya que la digitalización, a través de la previsión de la demanda, el seguimiento en tiempo real y la gestión optimizada del inventario, contribuye directamente a minimizar las pérdidas de productos perecederos (Bocean, C. G., 2024). La optimización del uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas en la producción primaria, también contribuye a la sostenibilidad ambiental. Además, la trazabilidad impulsada por *blockchain* puede promover el abastecimiento sostenible al verificar que los proveedores cumplen con los estándares éticos y ambientales (Ellahi, R. M. et al., 2024).

#### 2.4.3. Calidad del servicio al cliente

La calidad del servicio al cliente es un indicador esencial que refleja la capacidad de la cadena de suministro para satisfacer las expectativas del consumidor y construir lealtad a la marca. La satisfacción del cliente se logra mediante la entrega de productos frescos y de alta calidad, lo cual es posible gracias al control de la cadena de frío y la reducción del deterioro. Los tiempos de entrega puntuales y el cumplimiento de las ventanas de tiempo de entrega son cruciales para la experiencia del cliente. La transparencia y la trazabilidad del producto, habilitadas por tecnologías como *blockchain*, permiten a los clientes acceder a información detallada sobre el origen y las condiciones de transporte, lo que genera confianza y reduce el escepticismo sobre afirmaciones engañosas. La confianza del consumidor hacia los alimentos orgánicos puede fortalecerse a través de sistemas de trazabilidad basados en blockchain (Duong et al., 2025). Las notificaciones automáticas y el seguimiento de pedidos en línea mantienen a los clientes informados sobre el progreso de su entrega, mejorando la experiencia general. La discreción y la disponibilidad 24/7 que ofrecen los *lockers* inteligentes también contribuyen a una mejor calidad de servicio, adaptándose a las necesidades y horarios de los consumidores (Ellahi, R. M. et al., 2024).

## 3. METODOLOGÍA

Este estudio adopta un enfoque exploratorio-descriptivo, con el objetivo de identificar, analizar y clasificar las principales soluciones tecnológicas aplicadas a la distribución urbana de productos frutihortícolas en la etapa de última milla. Dado que se trata de un campo en constante evolución, con fuerte incidencia de la innovación tecnológica, se considera pertinente utilizar una metodología basada en la revisión sistemática de fuentes secundarias y el análisis cualitativo de tendencias.

### 3.1. Revisión bibliográfica y tecnológica

La principal técnica utilizada será la revisión bibliográfica sistemática, complementada por la identificación de desarrollos tecnológicos recientes. Para ello, se consultarán bases de datos académicas reconocidas (*Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar*), así como documentos técnicos, informes de organismos internacionales (FAO, CEPAL, BID) y reportes de empresas proveedoras de soluciones logísticas innovadoras.

Los criterios de inclusión de fuentes serán:

- Relevancia directa con la temática de logística de última milla en productos perecederos.
- Enfoque en tecnologías aplicadas a la distribución urbana.
- Publicaciones entre los años 2015 y 2025, priorizando artículos revisados por pares y casos documentados en contextos urbanos.
- Fuentes en idioma español e inglés.

### 3.2. Clasificación y análisis de tecnologías

Una vez identificadas las tecnologías relevantes se procederá a clasificarlas según su funcionalidad, grado de adopción, ventajas operativas y requerimientos de implementación.

### 3.3. Evaluación mediante indicadores clave

A fin de estudiar el impacto potencial de las soluciones tecnológicas identificadas, se empleará una matriz de evaluación basada en tres dimensiones principales:

- Eficiencia operativa: reducción de tiempos de entrega, mejora en la utilización de recursos, optimización de rutas.
- Sostenibilidad ambiental: disminución de emisiones, uso de energías limpias, reducción del desperdicio.
- Calidad del servicio: mantenimiento de la cadena de frío, trazabilidad, cumplimiento de ventanas horarias.

## 4. DESARROLLO

A partir del marco conceptual expuesto, en este apartado se analizan las tendencias tecnológicas identificadas y su grado de adopción, proponiendo esquemas de integración que permitan diseñar modelos logísticos innovadores y adaptables a distintos contextos

### 4.1. Tendencias tecnológicas identificadas

Las tecnologías digitales están redefiniendo la logística de última milla para productos frutihortícolas, ofreciendo soluciones innovadoras para los desafíos inherentes a su limitada vida útil y a los entornos urbanos.

#### 4.1.1. Descripción y funcionamiento

Los vehículos autónomos y eléctricos están emergiendo como una tendencia clave para el transporte de última milla. Empresas como Nuro han desarrollado vehículos eléctricos compactos, diseñados específicamente para la entrega de mercancías, que incluyen compartimentos con temperatura controlada para mantener productos frescos, lácteos y comidas en condiciones óptimas durante el tránsito. Estos vehículos son totalmente eléctricos, lo que significa cero emisiones, y están optimizados para operaciones de entregas eficientes y escalables en entornos urbanos modernos. Su implementación, sin embargo, presenta desafíos en la predicción precisa del consumo de energía para la planificación de rutas.

Los *lockers* inteligentes ofrecen una solución flexible y segura para la entrega de productos. Estos casilleros automatizados permiten el acceso 24/7 a los artículos, lo que es particularmente útil para consumidores con horarios no tradicionales, ofreciendo una recogida discreta y sin contacto. Para productos frescos, los *lockers* inteligentes pueden incorporar almacenamiento refrigerado, asegurando que artículos como lácteos o frutas se mantengan en condiciones adecuadas. Además, facilitan el

seguimiento del inventario, lo que permite a los administradores optimizar el stock y priorizar los artículos próximos a caducar, contribuyendo a la reducción del desperdicio de alimentos. El despliegue de *lockers* inteligentes para alimentos frescos está siendo explorado como estrategia discreta y escalable en campus y comunidades (Smiota, n.d.).

Las plataformas digitales para optimización de rutas son herramientas cruciales que determinan las rutas más eficientes para una flota de vehículos, equilibrando múltiples objetivos y restricciones. Estas plataformas permiten reducir los costos de entrega al aumentar la densidad de las rutas y minimizar el tiempo de inactividad de los conductores. Para el transporte de productos frescos, son capaces de considerar restricciones específicas de la cadena de frío, asignando pedidos a camiones según las necesidades de control de temperatura y asegurando el cumplimiento de las ventanas de tiempo de entrega. Plataformas digitales como Kardinal.ai y Route4Me evidencian el papel de la analítica avanzada en la reducción de costos y tiempos en la distribución de perecederos (Kardinal.ai, n.d.; Route4Me, n.d.). La anticipación inteligente del tráfico y el ajuste dinámico de rutas en tiempo real son características clave, permitiendo optimizar las rutas continuamente incluso después de que los vehículos hayan partido, integrando eventos imprevistos como clientes ausentes o interrupciones del tráfico.

El Internet de las Cosas (IoT), los sensores de temperatura y la trazabilidad son fundamentales para la visibilidad en tiempo real. Los dispositivos IoT, que incluyen sensores, GPS y redes inalámbricas, permiten el seguimiento continuo de los productos alimenticios durante el tránsito y el almacenamiento, proporcionando datos sobre temperatura, humedad y composición de gases. Sensores más avanzados, como las narices electrónicas (E-Noses) y las lenguas electrónicas (E-Tongues), pueden detectar olores y analizar composiciones líquidas para evaluar la frescura o el deterioro. La tecnología *blockchain* complementa al IoT al proporcionar un libro de contabilidad digital descentralizado e inalterable que registra de forma segura e inmutable las transacciones desde la producción hasta la venta minorista, verificando la autenticidad y el origen del producto y mejorando la confianza del consumidor.

### 4.1.2. Grado de adopción actual en contextos urbanos

La adopción de estas tecnologías está en constante crecimiento. Nuro ha establecido asociaciones con empresas como Domino's, CVS, Kroger y Uber para la entrega autónoma de última milla, demostrando la viabilidad de sus vehículos en entornos urbanos. Walmart ha implementado inteligencia artificial y tecnología automatizada en su cadena de suministro global, incluyendo sistemas predictivos en Coyol, Costa Rica, para clasificar productos frescos y sistemas de "inventario auto-reparador" en la Ciudad de México que redirigen productos para evitar el exceso de existencias. Migros, un importante minorista de comestibles en Suiza, ha digitalizado sus operaciones para reducir el deterioro de frutas y verduras frescas, utilizando datos históricos y de punto de venta en vivo para automatizar pedidos y optimizar el inventario (Seifert, R. et al., 2017).

En el contexto de las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) agroalimentarias, la transformación digital es crucial para mejorar el rendimiento y la eficiencia, aunque su grado de adopción varía. Si bien hay una creciente conciencia sobre los beneficios de las TIC, persisten desafíos como la inversión inadecuada, la falta de capital y la adhesión a modelos de negocio tradicionales. Sin embargo, estudios en América Latina y el Caribe (ALC) han mostrado una notable resiliencia e implementación de innovaciones en la cadena agroalimentaria durante la pandemia de COVID-19, con más del 70% de las empresas implementando innovaciones, muchas de ellas a largo plazo. Esto sugiere un potencial significativo para una mayor adopción en la región, especialmente con el apoyo público o privado y el acceso al crédito (Frau, M. et al., 2022).

## 4.2. Integración de tecnologías en modelos logísticos innovadores

La sinergia de las tecnologías digitales permite la creación de modelos logísticos innovadores que abordan los desafíos específicos de la última milla frutihortícola.

### 4.2.1. Propuestas de esquemas de distribución basados en tecnología

Los esquemas de distribución innovadores se centran en la creación de cadenas de suministro de respuesta rápida habilitadas por tecnología, como el concepto "*Terra-fresh*", que integra planificación,

análisis y coordinación para construir cadenas cortas y orientadas al mercado, resilientes a través de la reconfigurabilidad basada en datos en tiempo real (Peinado-Guerrero, M., et al., 2022). Esto implica la integración profunda de IoT, IA, Big Data y *Blockchain* para proporcionar una visibilidad completa, análisis predictivos avanzados y una trazabilidad inmutable desde la granja hasta el consumidor.

La automatización de almacenes y procesos mediante robótica es fundamental. Esto incluye la recolección robótica de frutas maduras, líneas de procesamiento automatizadas para clasificación y envasado, y sistemas de almacenamiento y recuperación automatizados que reducen errores y acortan los tiempos de entrega. Los robots móviles autónomos pueden utilizarse para la recolección asistida y equiparse con sensores para monitorear la calidad de los productos frescos en los almacenes (MorePeople, 2024).

Conceptos como el "inventario auto-reparador" del supermercado Walmart, que redirige automáticamente los productos a donde más se necesitan antes de que el exceso de existencias se convierta en desperdicio, y el "*Smart Data Escrow*", que permite el intercambio de datos controlados entre socios de la cadena de suministro sin comprometer la información propietaria, son ejemplos de cómo la tecnología puede crear sistemas más inteligentes y eficientes. Estos esquemas buscan pasar de una gestión reactiva a operaciones proactivas y fluidas, optimizando el abastecimiento, la trazabilidad y la rentabilidad.

### 4.2.2. Adaptabilidad a contextos locales o regionales

La implementación de estos modelos innovadores debe considerar la adaptabilidad a contextos locales y regionales, especialmente en áreas como América Latina. Las PyMEs agroalimentarias en estas regiones a menudo enfrentan barreras significativas como la inversión inadecuada, la falta de capital y la adhesión a modelos de negocio tradicionales. (Peinado-Guerrero, M., et al., 2022).

Para una adopción exitosa, es crucial el apoyo público y privado a largo plazo, así como el acceso al crédito, que han demostrado ser factores clave para la implementación de innovaciones duraderas en ALC. Las soluciones deben ser escalables y adaptables a las necesidades locales, aprovechando una columna vertebral tecnológica unificada que permita la personalización para mercados específicos. Esto implica diseñar sistemas digitales modulares que puedan ajustarse a las particularidades de cada región, maximizando el retorno de la inversión y acelerando la implementación (Dong, Y. et al., 2023).

Además, la alfabetización digital y la capacitación de la fuerza laboral son esenciales para la transición. A medida que la automatización y la IA se integran más, los roles humanos evolucionarán de la mano de obra manual a la supervisión, el análisis de datos y la gestión de sistemas, lo que requiere un enfoque en el desarrollo de competencias digitales y analíticas. La colaboración entre los actores de la cadena de suministro, facilitada por plataformas digitales, es fundamental para una coordinación en tiempo real y una respuesta rápida a las fluctuaciones del mercado (Seifert, R., et al., 2017).

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se exponen a continuación los resultados de la revisión y su discusión en torno a las estrategias tecnológicas identificadas para la última milla frutihortícola

### 5.1. Principales hallazgos de la revisión

La implementación de tecnologías emergentes en la logística de última milla para productos frutihortícolas augura un impacto transformador en la eficiencia operativa, la sostenibilidad ambiental y la calidad del servicio al cliente. La innovación en cadenas agroalimentarias de América Latina y el Caribe mostró resiliencia frente a la pandemia, destacando la importancia de la digitalización en contextos de crisis (IDB Invest, 2024).

El potencial de la inteligencia artificial aplicada a la gestión de inventarios perecederos aún requiere exploración, particularmente en entornos con alta variabilidad de la demanda (Şimşek, 2024). Los datos de disponibilidad y pérdidas alimentarias, como los reportados por el USDA (2025), podrían servir como base para modelar la eficiencia de la última milla en productos frescos.

Casos como el de LCR International (2024) señalan que las tecnologías emergentes no solo transforman la logística, sino también los perfiles y competencias de las personas que participan en la cadena de valor. La experiencia de empresas como Nuro confirma la factibilidad de integrar vehículos

autónomos a gran escala en la distribución urbana (Nuro, n.d.). El análisis de riesgos operativos en mercados de África y Asia refuerza la necesidad de métricas claras y estrategias de mitigación para la entrega de perecederos (Rafiq, 2024). Reportes de expertos internacionales confirman que la transformación digital de la cadena de suministro de productos frescos será clave en los próximos años (Dodson, 2025).

La tabla 1 resume de manera comparativa los principales hallazgos de la investigación respecto a las cuatro innovaciones tecnológicas aplicadas a la cadena de suministro: vehículos autónomos y eléctricos, *lockers* inteligentes, plataformas digitales de optimización de rutas y el uso de IoT con trazabilidad mediante *blockchain*. La organización en tres ejes —eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y calidad del servicio al cliente— permite visualizar de forma clara y sintética los beneficios y aportes de cada tecnología, facilitando la comprensión de sus impactos diferenciales y su potencial para transformar la logística.

*Tabla 1: Matriz de evaluación. Elaboración propia*

| Innovación tecnológica | Eficiencia operativa | Sostenibilidad ambiental | Calidad del servicio al cliente |
|---|---|---|---|
| **Vehículos autónomos y eléctricos** | Reducción de costos laborales (hasta 40% en última milla). Operación 24/7 con rutas optimizadas por IA. Mejora en productividad y reducción de tiempos de entrega. | Cero emisiones directas. Menor huella de carbono gracias a la electricidad y optimización de rutas. | Entregas rápidas y consistentes. Mayor fiabilidad y llegada en condiciones óptimas. |
| **Lockers inteligentes** | Eliminan fallos y reentregas. Reducción de costos de última milla. Posibilitan almacenamiento refrigerado y optimización del stock. | Menor tráfico, ruido y emisiones por consolidación de entregas. Reducción del desperdicio de alimentos. | Acceso 24/7, flexibilidad y seguridad en la recogida. Notificaciones automáticas que mejoran la experiencia. |
| **Plataformas digitales para optimización de rutas** | Disminuyen costos operativos (combustible, desgaste, tiempos muertos). Incrementan productividad hasta un 15%. Ajustes dinámicos en tiempo real. | Reducción de emisiones y consumo de combustible. Favorecen el uso de vehículos eléctricos. | Garantizan entregas puntuales y dentro de ventanas horarias. Comunicación en tiempo real aumenta la transparencia. |
| **IoT, sensores de temperatura y trazabilidad (Blockchain)** | Monitoreo en tiempo real de condiciones y ubicación. Reducción de deterioro e inventario optimizado (FIFO). | Menor desperdicio de alimentos. Optimización del uso de recursos en agricultura de precisión. Menos emisiones por reducción de productos dañados. | Frescura y calidad garantizadas. Confianza del consumidor por trazabilidad verificable y lucha contra la falsificación. |

### 5.2. Contribución teórica y práctica

Este estudio contribuye al conocimiento de soluciones de última milla para productos frutihortícolas al proporcionar una descripción de las tecnologías digitales emergentes. Se destaca la necesidad de considerar la degradación de la calidad dependiente del tiempo y las condiciones ambientales en tiempo real (temperatura, humedad, gases) y no solo la cantidad, lo cual es un factor crítico para los productos frescos.

El trabajo subraya la importancia de la coordinación en tiempo real y la colaboración entre todos los actores de la cadena de suministro, desde el productor hasta el consumidor final, para lograr una verdadera capacidad de respuesta rápida. Se enfatiza el diseño de sistemas logísticos que sean

inherentemente resilientes y reconfigurables, capaces de adaptarse dinámicamente a cambios imprevistos en la demanda o la oferta, un cambio de paradigma de la gestión reactiva a la proactiva.

Se plantean también opciones para la toma de decisiones estratégicas tales como priorizar la inversión en infraestructura robusta de IoT y en la gestión de datos de alta calidad, ya que la precisión de los datos es la base para todas las capacidades digitales avanzadas. Implementar modelos de IA y aprendizaje automático para la previsión de la demanda y la optimización del inventario es crucial, superando los métodos tradicionales que no pueden manejar la complejidad y la dinámica de los productos frescos. Utilizar la tecnología *blockchain* para mejorar la trazabilidad y construir la confianza del consumidor, especialmente para productos de alto valor o certificados, diferenciando la oferta y satisfaciendo las demandas de transparencia del mercado.

Sería de suma importancia que las soluciones puedan ser adaptables a contextos locales y regionales, especialmente para las PyMEs en América Latina, lo que implica superar las barreras de inversión y capacitación. Tampoco se puede soslayar que la creciente automatización y la integración de la IA requieren una inversión en la recalificación de los empleados para que puedan operar y gestionar estos sistemas avanzados.

### 5.3. Limitaciones del estudio

Este estudio, al ser una revisión bibliográfica y tecnológica, no es un estudio empírico primario, lo que significa que no se generaron datos nuevos ni se realizaron experimentos controlados. La información se basa en fuentes secundarias publicadas.

La investigación se limita a la información disponible públicamente, que puede no ser exhaustiva en ciertos detalles operativos o financieros de las implementaciones tecnológicas. Además, las publicaciones pueden tener un sesgo hacia los éxitos, subestimando los desafíos o fracasos.

Las tecnologías emergentes, especialmente en el ámbito digital, evolucionan a un ritmo acelerado. Esto implica que algunas descripciones o grados de adopción pueden quedar desactualizados en un corto período de tiempo.

El énfasis principal del estudio está en los beneficios de las soluciones de aplicar tecnologías digitales. Las complejidades de la implementación, como los altos costos iniciales, la integración de sistemas heterogéneos, la resistencia al cambio organizacional y las posibles consecuencias no deseadas (ej. aumento del consumo de recursos por mayor eficiencia), podrían requerir un análisis más profundo.

### 5.4. Líneas futuras de investigación

A partir de las limitaciones identificadas y las tendencias emergentes, se proponen las siguientes líneas futuras de investigación:

- Desarrollar modelos cuantitativos que integren la degradación de la calidad dependiente del tiempo y las condiciones ambientales en tiempo real (temperatura, humedad, gases) para la optimización de rutas y la gestión de inventario en la última milla de productos frutihortícolas.
- Crear modelos de simulación para evaluar el impacto sinérgico de la integración de múltiples tecnologías en escenarios urbanos específicos, cuantificando los beneficios en eficiencia, sostenibilidad y calidad del servicio.
- Investigar el uso de la teoría de juegos para analizar la interacción estratégica entre los diferentes actores de la cadena de suministro (productores, distribuidores, minoristas, consumidores) y el impacto de las políticas de subsidio gubernamentales en la voluntad de adoptar tecnologías digitales.
- Desarrollar modelos de aprendizaje profundo para predecir con alta precisión el consumo de energía de vehículos eléctricos en rutas de última milla, considerando factores como la topografía, el tráfico y el comportamiento del conductor, para una planificación de rutas más eficiente y sostenible.

## 6. CONCLUSIONES

La logística de última milla para productos frutihortícolas se erige como un componente crítico y desafiante en la cadena de suministro moderna, exacerbado por la naturaleza perecedera de los productos y las complejidades inherentes a los entornos urbanos. El crecimiento del comercio

electrónico y la evolución de las expectativas del consumidor han transformado este segmento en un eje estratégico, donde la rapidez, el control de calidad y la eficiencia son imperativos para minimizar el desperdicio y garantizar la satisfacción del cliente.

Este estudio, a partir de la revisión bibliográfica y tecnológica, permitió identificar estrategias emergentes con alto potencial de impacto: vehículos autónomos y eléctricos, *lockers* inteligentes, plataformas digitales de optimización de rutas y soluciones de IoT y *blockchain*. Estas tecnologías demostraron ser catalizadores fundamentales para mejorar indicadores clave de eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y calidad del servicio al cliente, contribuyendo a reducir pérdidas, fortalecer la trazabilidad y transformar la última milla en una ventaja competitiva.

Si bien la adopción tecnológica en PyMEs y en contextos regionales enfrenta barreras de inversión y capacitación, la resiliencia demostrada por el sector agroalimentario latinoamericano subraya el potencial de adaptación y el valor estratégico de estas innovaciones con el apoyo adecuado.

Las recomendaciones estratégicas enfatizan la necesidad de invertir en infraestructura de datos, adoptar análisis predictivos, aprovechar *blockchain* para la confianza, fomentar la colaboración y adaptar las soluciones a los contextos locales, al tiempo que se impulsa la recualificación de la fuerza laboral.

A pesar de las limitaciones inherentes a una revisión bibliográfica, este trabajo abre diversas líneas futuras de investigación, desde el desarrollo de modelos cuantitativos que integren la degradación de la calidad en tiempo real, hasta la evaluación empírica mediante simulaciones o proyectos piloto en entornos reales.

En definitiva, la integración estratégica de estas tecnologías no es solo una opción, sino una necesidad imperante para construir cadenas de suministro frutihortícolas rápidas, eficientes, resilientes y sostenibles en un mundo en constante cambio.

## 7. REFERENCIAS


Ahmed, E., & Elgalb, A. (2024). Optimizing supply chain logistics with big data and AI: Applications for reducing food waste. *Journal of Current Science and Research Review, 2*(02), 29-39.

Asimiyu, Z. (2024). [Referencia citada en texto, completar con datos de publicación si corresponde].

Barrios Estrada, F. (2022). [Referencia citada en texto, completar con datos de publicación si corresponde].

Bocean, C. G. (2024). [Referencia citada en texto, completar con datos de publicación si corresponde].

Dong, Y., Ahmad, S. F., Irshad, M., Al-Razgan, M., Ali, Y. A., & Awwad, E. M. (2023). The digitalization paradigm: Impacts on agri-food supply chain profitability and sustainability. *Sustainability, 15*(21), 15627. https://doi.org/10.3390/su152115627

Duong, C. D., Dao, T. T., Vu, T. N., Ngo, T. V. N., & Nguyen, M. H. (2025). Blockchain-enabled food traceability system and consumers' organic food consumption: A moderated mediation model of blockchain knowledge and trust in the organic food chain. *Journal of Retailing and Consumer Services, 82*, 103901. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2025.103901

Ellahi, R. M., et al. (2024). [Referencia citada en texto, completar con datos de publicación si corresponde].

Falayi, A., Ayeni, A., Adebayo, B., & Abdullahi, A. (2024). Towards digitalization of fruits and vegetables supply chain: Digital twins and Internet of Things approach. *Global Journals of Research in Engineering, 24*(G1), 11–20.

Frau, M., Moreno, M., Moi, L., & Cabiddu, F. (2022). Digital transformation through the lens of digital data handling: An exploratory analysis of agri-food SMEs. *Journal of Small Business Strategy, 32*(3).

Gevaers, R., Van de Voorde, E., & Vanelslander, T. (2011). Characteristics and typology of last-mile logistics from an innovation perspective in an urban context. En *City distribution and urban freight transport: Multiple perspectives* (pp. 56-71). Edward Elgar Publishing.

Gómez, Á., et al. (2024). [Referencia citada en texto, completar con datos de publicación si corresponde].

IDB Invest. (2024). *COVID-19 and innovation in agrifood systems in Latin America and the Caribbean*. Banco Interamericano de Desarrollo.

Kardinal.ai. (n.d.). *Route optimization: Addressing the challenges of fresh produce transport*. https://kardinal.ai/route-optimization-addressing-the-challenges-of-fresh-produce-transport/

LCR International. (2024, febrero 2). *How emerging technologies are shaping the future of people in fresh produce*. https://www.lcrint.com/blog/how-emerging-technologies-are-shaping-the-future-of-people-in-fresh-produce

Nuro. (n.d.). *Decoding Nuro: From last-mile delivery to scaled autonomy*. https://www.boringsage.com/post/decoding-nuro-from-last-mile-delivery-to-scaled-autonomy

Peinado-Guerrero, M., & Villalobos, J. R. (2022). Technology-enabled, rapid-response fresh food supply chains: A paradigm and case study. *Transportation Research Procedia, 67*, 39-45. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.12.005

Pitney Bowes. (2025, junio 9). *Breaking barriers: Smart lockers for campus food pantries*. Pitney Bowes. https://www.pitneybowes.com/us/blog/smart-lockers-campus-food-pantry.html

Rafiq, S. (2024). Operational risks, mitigation strategies, and key performance indicators in last-mile delivery of perishable goods for African and Asian retailers. Linnaeus University.

Rabehi, A., et al. (2024). [Referencia citada en texto, completar con datos de publicación si corresponde].

Route4Me. (n.d.). *Food and beverage route optimization*. https://route4me.com/solutions/food-and-beverage-routing-software

Seifert, R., & Kirci, M. (2017). Digitalization: A fresh idea for the fruit and veg supply chain. *IMD Research Knowledge*.

Şimşek, A. B. (2024). AI in managing perishable goods inventory. En *AI and smart manufacturing: Building Industry 4.0* (pp. 29-70). IGI Global.

Smiota. (n.d.). *Solving campus hunger with smart food lockers: A scalable, 24/7, discreet solution*. https://smiota.com/resources/solving-campus-hunger-with-smart-food-lockers/

Snoeck, A., Bhargava, A., Merchan, D., Davis, J., & Pachon, J. (2024). Energy estimation of last-mile electric vehicle routes. *arXiv preprint arXiv:2408.12006*.

Sridhar, A., Ponnuchamy, M., Kumar, P. S., Kapoor, A., Vo, D.-V. N., & Rangasamy, G. (2023). Digitalization of the agro-food sector for achieving sustainable development goals: A review. *Sustainable Food Technology, 1*(4), 783-801. https://doi.org/10.1002/sft2.68

Su, J., Wu, J., & Liu, C. (2014). Research on coordination of fresh produce supply chain in big market sales environment. *Scientific World Journal, 2014*, 873980. https://doi.org/10.1155/2014/873980

Tokala, V. Y., & Mohammed, M. (2022). *Cold chain management for the fresh produce industry in the developing world*. CRC Press.

USDA Economic Research Service. (2025, enero 5). *Food availability (per capita) data system: Food loss*. United States Department of Agriculture. https://www.ers.usda.gov/data-products/food-availability-per-capita-data-system/food-loss

# *SISTEMA DE TRANSPORTE SUBTERRÁNEO EN CIUDADES LATINOAMERICANAS: UN ANÁLISIS DE LAS CALIFICACIONES DE GOOGLE MAPS DE LAS PRINCIPALES ESTACIONES DE SÃO PAULO Y BUENOS AIRES*

Souza, Hadassa*; Oliveira, Rodrigo*; Crespi, Mario**; Tittonel, Marcelo**; Machado, Sivanilza***

*Instituto Federal de São Paulo, campus São Paulo - Departamento de Mecánica**
*Depto. de Ingeniería de la Producción, Facultad de Ingeniería – UNLP Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata***
*Instituto Federal de São Paulo, campus Guarulhos****
*rodrigo.oliveira@ifsp.edu.br*

**RESUMEN**

El sistema ferroviario subterráneo es esencial para garantizar la eficiencia, accesibilidad y sostenibilidad del transporte público de pasajeros. Sin embargo, el uso del servicio de transporte en las grandes metrópolis, como las ciudades de São Paulo y Buenos Aires —que presentan una alta densidad poblacional— no siempre cumple con las expectativas. Este artículo tiene como objetivo analizar las percepciones de los usuarios sobre los servicios ferroviarios subterráneos en las estaciones más concurridas, Sé y Constitución, utilizando Contenido Generado por Usuarios (CGU) de Google Maps, e identificar sus necesidades para promover infraestructuras de movilidad más sostenibles, en línea con los ODS 9 y 11 de la ONU. Para ello, se llevó a cabo una investigación documental mediante la selección de comentarios relevantes publicados entre junio de 2024 y mayo de 2025. Para interpretar éstos comentarios se realizó un análisis de sentimientos mediante Inteligencia Artificial DeepSeek-V3, utilizando Procesamiento de Lenguaje Natural para interpretar los testimonios. A partir de las evaluaciones de los pasajeros, se identificaron las críticas predominantes relacionadas con el hacinamiento, la limpieza y la accesibilidad. No obstante, los resultados refuerzan la necesidad de invertir en la ampliación de la capacidad, la accesibilidad y la integración modal, con el fin de mejorar la experiencia del usuario y la gestión operacional para mayor eficiencia de los sistemas subterráneos en ambas ciudades.

**Palabras clave:** Sistema de transporte ferroviario subterráneo metropolitano; Análisis de Sentimientos; Contenido Generado por el Usuario (CGU).

***ABSTRACT***

The subway system is essential for ensuring the efficiency, accessibility, and sustainability of public passenger transport. However, the consumption of transport services in large metropolises, such as São Paulo and Buenos Aires—which have high population densities—is not always guaranteed as expected. This paper aims to analyze users' perceptions of metro services at the busiest stations, Sé and Constitución, using User-Generated Content (UGC) from Google Maps. It also seeks to identify user needs for fostering more sustainable mobility infrastructures, in line with UN SDGs 9 and 11. To achieve this, a documentary study was conducted by selecting relevant comments published between June 2024 and May 2025. Sentiment analysis was performed using DeepSeek-V3 Artificial Intelligence with Natural Language Processing to interpret the testimonials. Based on passenger reviews, predominant criticisms related to overcrowding, cleanliness, and accessibility were identified. Nevertheless, the results reinforce the need for investments in capacity expansion, accessibility, and modal integration, aiming to improve user experience and operational management for greater efficiency of the metro systems in both cities.

**Keywords:** Metro transport system; Sentiment Analysis; User-Generated Content (UGC).

## 1. INTRODUCCIÓN

La movilidad urbana, en especial el transporte ferroviario subterráneo en grandes metrópolis latinoamericanas como São Paulo y Buenos Aires, representa un complejo sistema sociotécnico cuyo desempeño impacta directamente la eficiencia operacional, la calidad de vida de la población y la sostenibilidad urbana (ODS 9 y 11). El transporte público urbano contribuye al desarrollo urbano sostenible, al viabilizar actividades económicas, facilitar el acceso a servicios esenciales y promover la integración regional.

Además de impulsar el crecimiento económico, los sistemas de transporte eficientes contribuyen directamente a la mejora de la calidad de vida en las ciudades. Sin embargo, la gestión de los sistemas de transporte enfrentan diversos desafíos relacionados principalmente con el alto volumen de pasajeros y la falta de infraestructura para la movilidad urbana. En este contexto, la gestión de las operaciones ferroviarias subterráneas, con el uso de innovaciones como el aprendizaje profundo y métodos adaptativos de coordinación, es crucial para garantizar la confiabilidad y la eficiencia de los servicios (Ying; Chow; Nguyen; Chin, 2022 & Zhang; Chai; Guo, 2023).

Con base en esto, este artículo tiene como objetivo analizar las percepciones de los usuarios sobre los servicios ferroviarios subterráneos de las estaciones más concurridas, Sé y Constitución, utilizando Contenido Generado por Usuarios (CGU) de Google Maps, e identificar las necesidades de los usuarios para fomentar infraestructuras de movilidad más sostenibles, conforme a los ODS 9 y 11 de la ONU. Para ello, se busca identificar los puntos fuertes y las áreas de mejora percibidas por los usuarios para optimizar la prestación del servicio, identificar patrones recurrentes en las evaluaciones de los usuarios y mejorar la gestión ferroviaria subterránea, conectando las expectativas de los pasajeros con las métricas de servicio. Además, se buscó proporcionar información detallada sobre las evaluaciones de los usuarios, fundamentadas en metodologías como el Análisis de Sentimientos, para apoyar a los agentes del sector en la toma de decisiones basadas en evidencia.

La tesis central de este trabajo es que con la evaluación del usuario, que utiliza los servicios ofrecidos diariamente, es posible tener una mejor comprensión de las necesidades de los pasajeros, lo que contribuye a una gestión más eficiente de las operaciones ferroviarias subterráneas, para que esta pueda abarcar la creciente demanda de pasajeros en las ciudades de São Paulo y Buenos Aires, que poseen un gran volumen poblacional.

Para alcanzar los objetivos propuestos, el trabajo adoptó el método inductivo, caracterizado por un estudio cualitativo, combinando enfoques exploratorios y descriptivos. El enfoque exploratorio se aplicó para investigar información relacionada con los servicios ferroviarios subterráneos en las ciudades seleccionadas, mientras que el enfoque descriptivo analiza el panorama actual de las evaluaciones y opiniones disponibles (Lakatos & Marconi, 2003).

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1. Relevancia del transporte público ferroviario subterráneo

Los sistemas de transportes ferroviarios subterráneos son fundamentales para el desarrollo urbano sostenible, especialmente en áreas metropolitanas densamente pobladas. Estos sistemas ofrecen transporte rápido y confiable, con capacidad para atender a grandes volúmenes de pasajeros.

El sistema ferroviarios subterráneos de pasajeros se destaca por la eficiencia en el consumo de energía, la ocupación de espacio y la reducción de la contaminación, siendo cruciales para aliviar la congestión del tráfico. La construcción y operación de estos sistemas deben ser componentes esenciales del planeamiento urbano (Kopsidas; Kepaptsoglou, 2022 & Zhang; Chai; Guo, 2023).

Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021), el transporte colectivo también se presenta como una alternativa menos contaminante en comparación con los vehículos individuales, lo que destaca su relevancia en un escenario de crisis climática y, a pesar de las dificultades enfrentadas con las demandas de pasajeros, el metro es un símbolo de desarrollo urbano.

Grandes ciudades latinoamericanas como São Paulo y Buenos Aires, dependen directamente de transportes públicos eficientes no solo para una movilidad urbana eficiente —que reduzca el tiempo de viaje o la reducción del tráfico—, sino principalmente por ser una herramienta de movilidad social, donde usuarios de diversas clases sociales, que por medio de la integración modal, tienen acceso a oportunidades de estudio, empleo y a servicios de salud fuera de su región, lo que contribuye a la inclusión social urbana (Brissa et al., 2022).

En cuanto a su evolución, Buenos Aires fue pionera en América Latina, inaugurando su primera línea en 1913 y hoy posee cerca de seis líneas (Línea A, Línea B, Línea C, Línea D, Línea E y Línea H), abarcando un total de 92 estaciones y cerca de 56,7 km de extensión (Gobierno de Buenos Aires, 2023), conforme la Figura 1 que demuestra el mapa de la red de Buenos Aires.

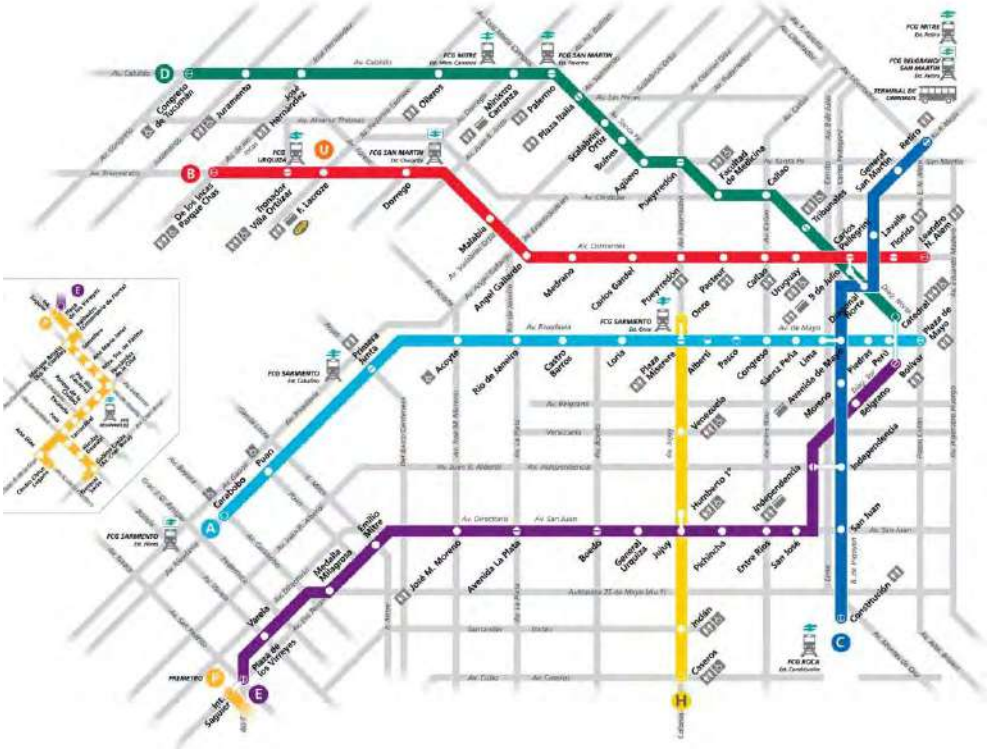


*Figura 1 Mapa de la red de subterráneos de Buenos Aires.*
*Fuente: Buenos Aires, 2023.*

Por otro lado, la ciudad de São Paulo inició sus operaciones en 1974, y actualmente también cuenta con seis líneas, distribuidas en 94 estaciones (1-Azul, 2-Verde, 3-Roja, 4-Amarilla, 5-Lila y 15-Plata), extendiéndose por 104.3 km (Gobierno del Estado de São Paulo, 2025). Esto se muestra en la Figura 2,



*Figura 2 Red de estaciones de São Paulo.*
*Fuente: São Paulo, 2025.*

Para ambas ciudades, el transporte público ferroviario subterráneo continúa en proceso de mutación, como un organismo vivo que, con el tiempo, se adapta al crecimiento poblacional, buscando alcanzar áreas aún no atendidas o históricamente descuidadas, mayor integración modal y sostenibilidad. Los transportes ferroviarios subterráneos de São Paulo y Buenos Aires enfrentan problemas similares de sobrepoblación, mantenimiento y presión por expansión, herencia de inversiones en urbanización acelerada, pero que no proporcionan una infraestructura de transporte que integre de forma uniforme el territorio urbano (Vasconcellos, 2017).

La estación Sé en São Paulo integra 4 líneas de metro (Líneas 1-Azul, 3-Roja, 4-Amarilla y CPTM) y registra un promedio diario de 1.5 millones de pasajeros (Metrô São Paulo, 2023), siendo el principal centro de integración modal de la ciudad y responsable del 22% del flujo total del sistema (SPUrbanismo, 2024). Mientras tanto, la estación Constitución en Buenos Aires es la terminal de las Líneas C, E y trenes de media y larga distancia, con 800 mil pasajeros/día (SBASE, 2024). Según el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires - GCBA (2023) concentra el 30% de las transferencias entre subterráneos y trenes en la región metropolitana.

### 2.2. La expresividad poblacional y urbana de las ciudades analizadas

La creciente urbanización global intensifica las necesidades de movilidad urbana, con estimaciones que apuntan a un crecimiento de la población mundial en 2.200 millones para 2050, y la población urbana mundial pasará del 56% del total global en 2021 al 68% en 2050 (Naciones Unidas Brasil, 2022). En 2022, el censo del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE) indicó que la población de São Paulo alcanzó un hito de 11.451.999 habitantes, mientras que el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC) en 2022 señaló que la ciudad de Buenos Aires alcanzó un total de 3.12 millones de habitantes. Según World Population Review (2025), estas ciudades se encuentran entre las cuatro ciudades más grandes de América Latina. Esta representatividad poblacional es uno de los factores históricos que generan desafíos para la gestión de los servicios de transporte que acaban no satisfaciendo las expectativas de los pasajeros en relación con la calidad del servicio prestado; sin embargo, también debe tenerse en cuenta el aspecto cultural del uso del automóvil, que de vehículo

particular pasó a formar parte de la rutina del ciudadano, sirviendo como alternativa para el desplazamiento.

En 2023, el sistema ferroviario subterráneo de Buenos Aires transportó cerca de 239.6 millones de pasajeros (Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2023), mientras que en São Paulo, el sistema de transporte subterráneo registró un promedio de 2.9 millones de pasajeros por día hábil, considerando las entradas y transferencias entre líneas (Gobierno del Estado de São Paulo, 2024). En este contexto, la promoción de infraestructuras de movilidad urbana sostenible es una prioridad global, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 9 y 11 (ODS) de la ONU para 2030 (United Nations, s.d.), que buscan transformar los sistemas de transporte en catalizadores de inclusión social, eficiencia energética y reducción de impactos ambientales.

Con poblaciones significativas y sistemas de transporte ferroviario subterráneo ampliamente utilizados, las ciudades de São Paulo y Buenos Aires presentan contextos urbanos diversos, lo que las hace relevantes para la investigación de los servicios de transporte público. La gestión del transporte público urbano de pasajeros exige un equipo técnico calificado, capaz de evaluar la calidad y funcionalidad de los servicios prestados a los usuarios, además de disponer de infraestructura, recursos técnicos y metodológicos adecuados para viabilizar sus funciones (Rocha & Ramos, 2018).

### 2.3. Contenido Generado por Usuarios (CGU) y Análisis de Sentimientos realizado por inteligencia artificial

El Análisis de Sentimientos (AS) es una tecnología para entender las emociones de los usuarios, permitiendo que las máquinas comprendan sentimientos humanos de manera precisa. El AS ha sido muy utilizado en organizaciones que buscan adaptar sus estrategias de marketing y atención (Chakriswaran et al., 2019; Taherdoost & Madanchian, 2023).

Para ello, también es necesario resaltar la importancia de la utilización del Contenido Generado por el Usuario (CGU) para esta investigación, ya que el CGU será la base para explorar las interacciones y opiniones de los usuarios, proporcionando una visión rica y contextualizada sobre los servicios ferroviarios subterráneos con la ayuda de DeepSeek-V3. El CGU emerge de la contribución voluntaria de una comunidad, que comparte información y experiencias por medio de diferentes medios, ofreciendo datos valiosos sobre la experiencia de los usuarios y permitiendo una comprensión más profunda de las necesidades y opiniones de los pasajeros (Krumm, Davies & Narayanaswami, 2008).

En este contexto, se destaca DeepSeek-V3 como una herramienta eficaz e innovadora para realizar el Análisis de Sentimientos. Su elección en el presente estudio se justifica por el creciente reconocimiento de su eficacia en tareas de Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN) y por la aplicación exitosa en diversos escenarios. También es importante resaltar la existencia del factor humano durante todo el proceso; la IA es una herramienta de apoyo para el análisis, pero la interpretación y validación humana es esencial para la validación de los resultados. Para que DeepSeek-V3 proporcione resultados precisos, la generación de prompts (comandos de análisis) debe ser criteriosa, lo que, inherentemente, introduce desafíos y limitaciones en el análisis de sentimientos por inteligencia artificial y procesamiento de lenguaje natural (PLN). Esto se debe a que se exige la interpretación de matices emocionales, contextos culturales e ironías, lo que puede resultar en interpretaciones incorrectas de las intenciones de los usuarios si no se realiza un filtro adecuado de los datos recolectados.

## 3. METODOLOGÍA

La investigación se concentró en las evaluaciones de dos estaciones, Sé y Constitución, de los sistemas ferroviarios subterráneos, localizadas en las ciudades de São Paulo y Buenos Aires. Para este análisis, la elección de las ciudades se basa en factores como el tamaño poblacional y la importancia económica de estas metrópolis, además de su representatividad en América Latina.

Para la recopilación de datos se utilizó la plataforma Google Maps, que ofrece una vasta gama de evaluaciones de usuarios sobre lugares, como restaurantes, atracciones turísticas y transportes, incluyendo subterráneos, además de permitir interacciones y contribuciones a través del programa Local Guides. Las evaluaciones publicadas en Google Maps son analizadas automáticamente para detectar contenido inapropiado, como evaluaciones falsas y spam, y aquellas que violen las políticas de contenido de la plataforma serán eliminadas, conforme a lo establecido en las directrices de Google (Google, 2025).

En este estudio se investigaron bases de datos de pasajeros por molinete, informes e indicadores gubernamentales o institucionales que cuantificaran cuáles estaciones de cada ciudad tuvieron el mayor movimiento de pasajeros durante un año, para finalmente realizar la recolección de las evaluaciones publicadas por usuarios de las estaciones en Google Maps, en el período de junio de 2024 a mayo de 2025. Conforme a la Figura 3 que demuestra el diagrama de flujo del proceso de recolección de datos realizado para la definición de las estaciones objetivo..

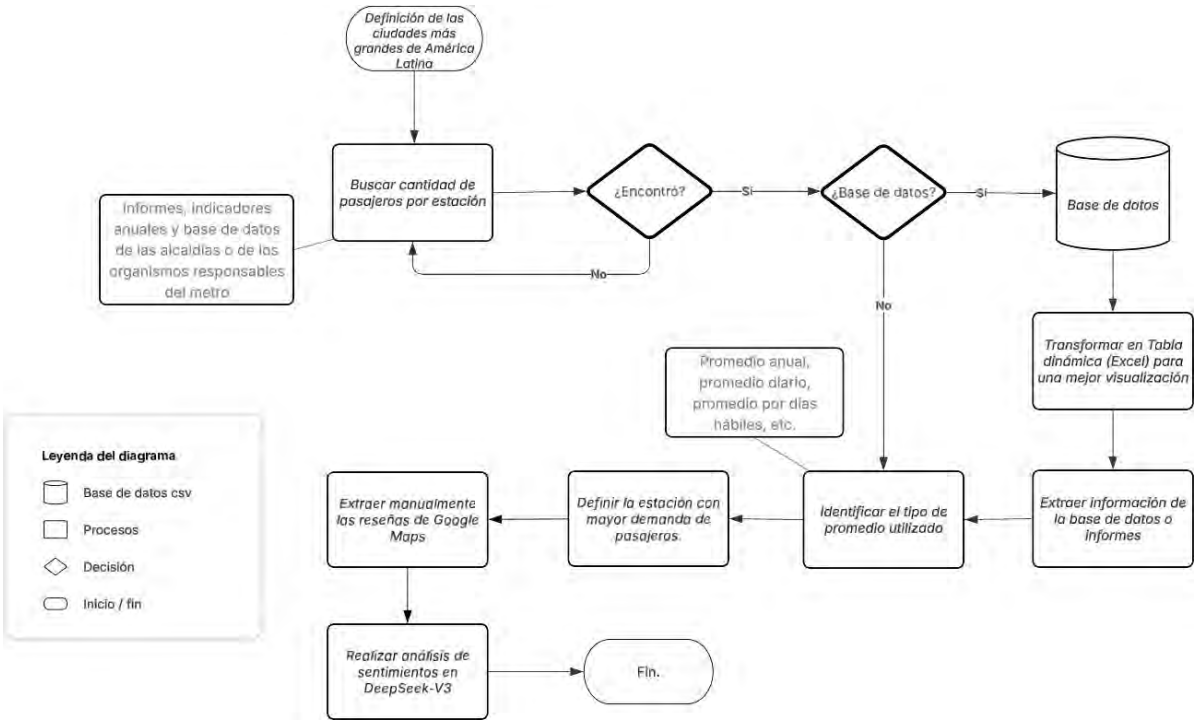



*Figura 3 Diagrama de flujo del proceso realizado en la recopilación de datos*
*Fuente: Elaboración propia*

Para la recopilación de datos se tuvieron en cuenta el número de estrellas otorgadas por el usuario, el nombre del usuario, el comentario, si hay fotos, si el usuario está clasificado como "Local Guide" y la fecha de publicación. Según Google Help (2025), existen diversos criterios para clasificar los comentarios como relevantes, incluyendo la calidad del contenido, la experiencia del usuario que escribió el comentario, ya que la plataforma toma en consideración el nivel de contribución que el usuario ya ha proporcionado anteriormente, la cantidad de votos "Útil", y la presencia de videos y fotos también son criterios de relevancia.

Los testimonios representan el Contenido Generado por el Usuario (CGU), definido como información compartida por usuarios en plataformas digitales, ofreciendo insights sobre experiencias y percepciones individuales (Krumm; Davies & Narayanaswami, 2008). En este estudio, el CGU se analizará según criterios como accesibilidad, atención al cliente, comodidades, confort y limpieza, condiciones ambientales, infraestructura, satisfacción con la tarifa y seguridad. El CGU será fundamental para explorar las interacciones y opiniones de los usuarios, proporcionando una visión rica y contextualizada sobre los servicios ferroviarios subterráneos.

El Análisis de Sentimientos (AS) se realizó con la ayuda de DeepSeek-V3 (actualización 07/2024), una herramienta basada en Inteligencia Artificial (IA) que utiliza recursos de Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN) para interpretar los testimonios. El uso de DeepSeek-V3 permitió procesar y analizar los datos textuales de forma eficiente, optimizando el tiempo y la interpretación de los resultados.

La IA se aplicó para:

1. Clasificar los testimonios como positivos, negativos o neutros, identificando matices emocionales que puedan indicar problemas o puntos fuertes en los servicios analizados.
2. Realizar la categorización temática de los testimonios, con base en criterios predefinidos, como accesibilidad, atención al cliente, comodidades, confort y limpieza, condiciones ambientales, infraestructura, satisfacción con la tarifa y seguridad.

Los datos recopilados fueron organizados y analizados utilizando métodos de estadística descriptiva. Se aplicaron técnicas estadísticas para describir los aspectos significativos de las evaluaciones y comparar las características de las opiniones entre las diferentes ciudades. Según Feijoo (2025) y Bussab & Morettin (2010), el método de la estadística descriptiva nos permite resumir y organizar la información recopilada, lo que facilita la comprensión de las opiniones recopiladas. La estadística descriptiva utiliza medidas como la media y la mediana que sirvieron para identificar tendencias centrales en las evaluaciones, conforme a la Ecuación (1) y (2) respectivamente. En la Ecuación (1), tenemos la media Me siendo igual a la suma de los valores de los datos ($X_1, \ldots, X_n$) dividido por el número de elementos del conjunto de datos ($n$). En la Ecuación (2), tenemos la mediana $M_d$ siendo igual a la suma de los valores de los datos ($X_1, X_n$) dividido por 2.

$$M_e = \frac{X_1+X_2+X_3+\ldots+X_n}{n} \quad \textbf{(1)}$$

$$M_d = \frac{X_1+X_n}{2} \quad \textbf{(2)}$$

Los criterios más mencionados en los testimonios fueron destacados utilizando la plataforma Tagul, con la creación de nubes de palabras —optándose por mantener los términos repetidos, en lugar de agruparlos, para una mejor visualización de las percepciones generales de los usuarios, donde los términos positivos están representados por el color azul, los términos negativos por el color rojo y los neutros (con menos carga emocional) por el color gris. También se utilizó la herramienta LucidChart para la elaboración del diagrama de flujo; las demás herramientas como Microsoft Word y Excel se utilizaron para estructurar y presentar los resultados en tablas, gráficos y nubes de palabras. Y al comparar los resultados entre las ciudades fue posible observar patrones, consenso o discordancia sobre la calidad del transporte.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Clasificación de las mayores estaciones de São Paulo y Buenos Aires

El Gobierno del Estado de São Paulo (2025) divulgó en el portal de transparencia del Metro de São Paulo los indicadores de 2025, donde consta que la estación más concurrida de la capital es la estación Sé. En 2024, en promedio, circularon en la estación, en días hábiles, considerando las transferencias entre las líneas 1-Azul y 3-Roja, entradas y salidas, cerca de 405 mil pasajeros.

El Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires (2025) divulgó y puso a disposición la base de datos de pasajeros por molinete y estación, de todas las estaciones de la red de subterráneos con funcionamiento de 05h15 a 23h45, referente al año 2024. A partir de la base de datos es posible verificar que la estación más concurrida fue la estación Constitución. El Gráfico 1 presenta la cantidad promedio de pasajeros por día en las estaciones más concurridas de Buenos Aires durante el año 2024.

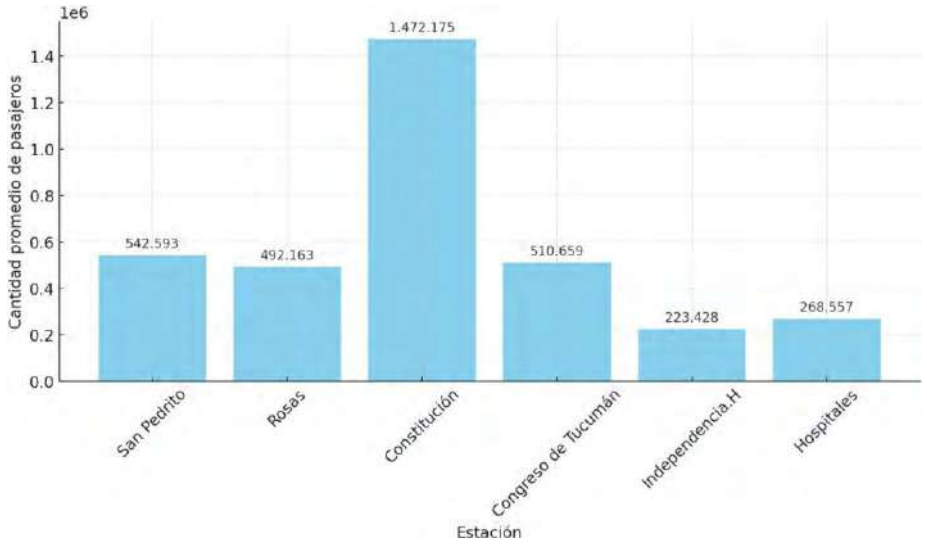



*Gráfico 1 Promedio diario de pasajeros por molinete en las estaciones más concurridas de todas las líneas de Buenos Aires en el año 2024.*
*Fuente: Elaboración propia con base en los datos del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, 2025.*

Se observa en el Gráfico 1 que la estación Constitución posee la mayor circulación de pasajeros, en promedio, cerca de 1.47 millones de pasajeros por año. Resumiendo los resultados, se tiene que las mayores estaciones de cada ciudad son: la estación Sé en São Paulo y la estación Constitución en Buenos Aires, Tabla 1.

*Tabla 1 Promedio de pasajeros del metro según la métrica adoptada por cada ciudad.*

| Ciudad | Estación | Línea | Cantidad | Promedio |
|---|---|---|---|---|
| São Paulo | Sé | 1 e 3 | 405.000 | Média nos dias Úteis |
| Buenos Aires | Constitución | C | 1.472.175 | Média anual |

*Fuente: Elaborado por los autores, conforme a los Informes de Subterráneos de Buenos Aires y de São Paulo, (2025)*

### 4.2. Análisis de las evaluaciones extraídas de Google Maps para las estaciones de las ciudades de Buenos Aires y São Paulo

Con base en las extracciones realizadas se obtuvieron 116 evaluaciones de usuarios que trataban de experiencias relacionadas con el servicio de metro de la estación Sé (Línea 3 - roja) en São Paulo (estación más utilizada, conforme datos del metro de São Paulo), las cuales están clasificadas de 1 a 5 por número de estrellas, el promedio de estrellas para este lugar y servicio es 4.3 estrellas, siendo que la mediana de las evaluaciones es 5 para infraestructura y eficiencia.

Entre las evaluaciones, 16 tienen fotos de la estación (13.79%), de su infraestructura o del volumen de personas en la estación en los horarios de mayor uso (hora pico), solo 44 evaluaciones (37.93%) describen experiencias en el transporte o relatan algún tipo de crítica o sugerencia a la estación, las demás evaluaciones comentan sobre el entorno de la estación, en el caso la Plaza de la Sé, o solo están clasificando por estrellas y no incluyen comentarios o fotos. Del total de evaluaciones, cerca de 102 fueron realizadas por "Local Guides" (87.93%), lo que clasifica el comentario como "Relevante" para los demás usuarios de la plataforma.

Para que una evaluación pertenezca a esta clase, Maps utiliza criterios como el número de personas que encontraron útil el comentario, el uso de fotos o caracteres de texto y el tiempo de contribución del usuario en la plataforma; en el caso de los "Local Guides", estos son usuarios que contribuyen frecuentemente a investigaciones o evaluando lugares en la plataforma de Google Maps y poseen

niveles de contribución; cuanto mayor sea el nivel de contribución, mayor será la relevancia de su comentario, pues el algoritmo entiende que se trata de una experiencia más cercana a la realidad (Google Help, 2025).

Se recopilaron en la estación Constitución en Buenos Aires, cerca de 29 evaluaciones de usuarios de Google Maps dentro de los criterios del período analizado y relevancia para la investigación, entre esas evaluaciones, el 65.52% está compuesto por comentarios sobre el servicio de subterráneo, sugerencias o críticas a la estación. De estas evaluaciones, el 100% fueron contribuciones de usuarios "Local Guides", en general, solo el 3.45% contribuyó con fotos de la estación. La media de estrellas dadas por los pasajeros es de 3.1 y la clasificación que más se repite en los comentarios es la de 3 estrellas.

En promedio, el 92.28% de las evaluaciones de las cuatro ciudades son contribuciones de Local Guides, lo que demuestra la preferencia categorizada del algoritmo para establecer la experiencia más confiable para las búsquedas de los usuarios. Los comentarios con caracteres destinados a sugerencias o críticas componen cerca del 47.10% de las evaluaciones generales, evidenciando que muchos usuarios solo clasifican el lugar por el número de estrellas y la gran mayoría prefiere no utilizar otros tipos de registros para describir su experiencia, como por ejemplo, solo el 5.76% de las evaluaciones de los usuarios están compuestas por fotos.

### 4.3. Resultados obtenidos por el análisis de sentimientos de DeepSeek-V3

Para el análisis de los sentimientos de los usuarios, se preestablecieron nueve criterios para categorizar las evaluaciones, los cuales fueron la base del prompt de análisis de DeepSeek-V3, siendo estos: eficiencia, accesibilidad, atención al cliente, comodidades, confort y limpieza, condiciones ambientales, infraestructura, satisfacción con la tarifa y seguridad, exigiendo atención a factores como integración modal, costo-beneficio, rapidez y mantenimiento. Se analizó individualmente cada estación con el fin de identificar los puntos positivos y negativos de cada criterio, para comparar los resultados obtenidos.

#### 4.3.1. Resultados de la estación Sé en São Paulo

Como se mencionó anteriormente, se utilizaron 116 evaluaciones de junio de 2024 a mayo de 2025 para el análisis de sentimientos de la estación Sé en São Paulo; la clasificación de los usuarios se realizó por la evaluación por estrellas, las cuales tuvieron la siguiente distribución: cerca del 62% de las evaluaciones fueron 5 estrellas, 22% 4 estrellas, 10% 3 estrellas, 2% 2 estrellas y 4% 1 estrella; la media de 4.3 estrellas se calculó conforme a la Ecuación (1) y la mediana de 5 estrellas conforme a la Ecuación (2).

El análisis de sentimientos realizado por DeepSeek-V3 arrojó resultados positivos y negativos con base en las palabras clave de las evaluaciones (criterios predefinidos) y su respectivo porcentaje global, Tabla 2.

*Tabla 2 Análisis de Sentimiento DeepSeek-V3, estación Sé (Palabras Clave y Porcentajes)*

| Categoría | Aspectos Positivos (58%) | Aspectos Negativos (42%) |
|---|---|---|
| Accesibilidad | Señalización clara (12%), integración entre líneas (10%), ascensores funcionales (5%) | Falta de accesibilidad en horas pico (7%), salidas cerradas (3%) |
| Atención al cliente | Guardias de seguridad presentes (5%), eficiencia en el servicio (4%) | Falta de personal para ayuda (2%) |
| Comodidades | Baños disponibles (3%), tiendas internas (2%) | Baños sucios/rotos (8%), falta de papel higiénico (4%) |
| Confort/Limpieza | Estación limpia (10%), organización (7%) | Olor desagradable (12%), hacinamiento extremo (15%) |
| Infraestructura | Estructura amplia (8%), arte y detalles | Falta de mantenimiento (10%), |

| | | |
|---|---|---|
| | históricos (5%) | andenes sin protección (5%) |
| Seguridad | Vigilancia visible (6%), sensación de seguridad (5%) | Robos/hurtos (9%), zona peligrosa (7%) |
| Integración Modal | Conexión con líneas azul/roja (12%), proximidad a puntos turísticos (5%) | Congestión en integraciones (4%) |
| Costo-Beneficio | Precio justo (3%) | Servicio caro para la calidad (2%) |

*Fuente: Elaborado por los autores, conforme dados extraídos do DeepSeek-V3 (2025).*

En general, como se puede observar en la Tabla 2, los usuarios valoran la funcionalidad (rapidez, integración) más que el confort, lo que explica que la mediana de estrellas sea igual a 5 y la media de estrellas de 4.3, lo que demuestra la alta satisfacción general. También expone que los mayores criterios de desvalorización del servicio para esta estación son los problemas crónicos de limpieza y aforo que no se adecuan a la demanda actual de pasajeros. Mientras el 58% de los comentarios destacan eficiencia y accesibilidad, el 42% señalan problemas estructurales y de seguridad. En esta estación existe una alta participación de Local Guides (78%), lo que sugiere que las evaluaciones son mayoritariamente de usuarios frecuentes, reforzando la confiabilidad de los datos. Los términos más frecuentes utilizados para la estación Sé se mapean conforme a la Figura 4, donde los términos positivos están representados por el color azul, los términos negativos por el color rojo.




*Figura 4 Nube de palabras de los usuarios de la estación Sé*

*Fuente: Elaboración propia basada en las evaluaciones de los usuarios.*

En cuanto a la eficiencia del metro de la Estación Sé, el 32% de las evaluaciones citan directamente aspectos relacionados con la eficiencia del servicio (positivos o negativos). Y fueron organizados por la siguiente distribución en las evaluaciones: el 62% de comentarios positivos definidos por los términos "Rápido", "Puntual", "Bien señalizado", "Integración fluida" y el 38% negativos siendo los términos más frecuentes "Demora en horario pico", "trenes superpoblados" y "falta de frecuencia". DeepSeek-V3 mapeó posibles soluciones, provenientes de las críticas de los usuarios al Metro de São Paulo para mitigar los principales problemas de la estación, como los casos de mantenimiento y limpieza, que requieren la realización de inversiones en sanitarios, control de olores y mantenimiento preventivo en escaleras mecánicas y ascensores; para la sobrepoblación es válido evaluar posibles expansiones para reducir el cúmulo de pasajeros en las horas pico, una vez que el análisis muestra que la estación es un hito histórico para el transporte paulista, pero requiere mejoras para atender la demanda actual y hacer su sistema de transporte más eficiente, que garantice una movilidad urbana más fluida, atendiendo así el ODS 11 de la ONU que también trata sobre la sostenibilidad de los transportes y eficiencia de la movilidad urbana.

### 4.3.2. Resultados de la estación Constitución en Buenos Aires

De las 436 evaluaciones disponibles en Google Maps para la estación Constitución en Buenos Aires, se recopilaron en total 29 evaluaciones que se encuadran dentro del período analizado (enero/2024 a mayo/2025) y que tratan de comentarios orientados al servicio de subterraneos. Esta es una diferencia

significativa si se compara con el número de evaluaciones de la estación Sé en São Paulo, esto se debe a que la estación Constitución integra en su operación los servicios de autobús y trenes, donde muchos comentarios se destinan a esos servicios, al entorno de la estación (centro comercial) o incluso específicamente a la arquitectura del lugar y también se incluyen en esta parte evaluaciones realizadas fuera del período analizado. De los comentarios, el 100% son contribuciones de Local Guides y la media de estrellas dadas para esta estación es de 3.1 (Ecuación (1)), mientras que la mediana de las clasificaciones es de 3 estrellas. En general, las puntuaciones se distribuyen de la siguiente manera: el 30% de los comentarios son de 5 estrellas, el 15% de 4 estrellas, el 25% de 3 estrellas, el 15% de 2 estrellas e igualmente para las evaluaciones de 1 estrella. El análisis de sentimientos realizado por DeepSeek-V3 con base en los criterios predefinidos, resultó en la distribución de los comentarios negativos con el mayor porcentaje (60%) y comentarios positivos con el 40%. Conforme a la Tabla 3, elaborada por la IA, que demuestra la distribución de los comentarios según los criterios.

*Tabla 3 Análisis de Sentimiento DeepSeek-V3, estación Constitución (Palabras Clave y Porcentajes)*

| Categoría | Aspectos Positivos (40%) | Aspectos Negativos (60%) |
|---|---|---|
| Accesibilidad | "Amplio" (5%), "Integración con trenes" (8%) | "Inaccesible para sillas de ruedas" (12%), "Falta de señalización" (7%) |
| Atención al cliente | - | "Policía ineficiente" (10%), "Falta de información" (5%) |
| Comodidades | "Arquitectura bonita" (10%) | "Baños sucios/clausurados" (20%), "Trenes viejos" (15%) |
| Confort/Limpieza | "Áreas limpias" (5%) | "Mugre" (25%), "Olor insoportable" (18%), "Inundaciones" (10%) |
| Seguridad | - | "Poca vigilancia" (15%), "Robos frecuentes" (8%) |
| Integración Modal | "Buena conexión con trenes" (12%) | "Caótico en horas pico" (10%) |
| Costo-Beneficio | - | "Tarifa cara para el servicio" (5%) |

*Fuente: Extraído de IA DeepSeek - V3*

La media de evaluaciones de los usuarios con relación a la eficiencia del servicio prestado es igual a 2.3, basándose en los comentarios que citan el tema; las principales críticas que disminuyen el índice de eficiencia giran en torno al 40% de quejas sobre el intervalo de tiempo, el 30% se destinan a la falta de coordinación entre otros transportes y el 20% a la sobrepoblación crónica.

El análisis de sentimientos destaca que los sentimientos negativos componen la mayoría de las evaluaciones (60%), especialmente las de 1 y 2 estrellas, destacando problemas graves de limpieza, seguridad e infraestructura. Los comentarios neutros son las evaluaciones de 3 estrellas que mencionan vagamente aspectos como el lugar o sin comentarios, solo la clasificación por estrellas. Y pocas evaluaciones (4-5 estrellas) elogian la estación, generalmente enfocándose en características aisladas como la arquitectura (10%). La Figura 5 demuestra la nube de palabras formada con los términos más utilizados en las evaluaciones, donde los términos frecuentemente negativos están representados por el color rojo, los términos neutros, sin carga emocional fuerte, están representados por el color gris, y los términos positivos están representados por el color azul.




*Figura 5 Nube de palabras de los usuarios de la estación Constitución*

*Fuente: Elaboración propia basada en las evaluaciones de los usuarios.*

Conforme a la nube de palabras, se destaca que la insatisfacción de los pasajeros gira en torno a la higiene de los baños de la estación, la infraestructura que muchas veces está sin mantenimiento; pocos citan la belleza de la arquitectura y cuestiones como tarifa, confort de los trenes y rapidez son menos frecuentes. Aunque este escenario es una realidad para ambas ciudades, la estación Sé (SP) tiene índices de insatisfacción menores en comparación con la estación Constitución (BA); podemos observar este comportamiento por medio de la Tabla 4, que demuestra los resultados del análisis de sentimientos para los criterios más destacados en las críticas de los pasajeros.

*Tabla 4 Comparación de resultados entre las estaciones Constitución y Sé*

| Criterios | Constitución (BA) | Sé (SP) |
|---|---|---|
| Promedio de Estrellas | 3,1 | 4,3 |
| Promedio (Eficiencia) | 2.6 | 4.0 |
| Limpieza (Neg.) | 60% | 42% |
| Seguridad (Neg.) | 23% | 16% |
| Puntualidad (Neg.) | 65% | 38% |
| Integración Modal (Pos.) | 12% | 15% |

*Fuente: Extraído de IA DeepSeek - V3*

## 5. CONCLUSIONES

El objetivo de esta investigación es contribuir a mejoras en la prestación de servicios de subterraneos a través del análisis de testimonios de usuarios de las principales estaciones de las ciudades analizadas, lo que permite identificar problemas crónicos de transporte e infraestructura desde la perspectiva de los pasajeros. Por lo tanto, con base en los datos obtenidos de los testimonios de las dos estaciones, se concluye que el análisis de sentimiento con una comparación de los principales resultados para cada criterio, se destacó por tener más críticas destinadas a la limpieza, seguridad, integración modal, eficiencia y puntualidad, lo que es un punto en común para ambas estaciones.

Además, las estaciones Sé y Constitución tienen los mismos problemas de infraestructura, ya que los usuarios señalan a través de quejas puntuales, especialmente sobre la limpieza y la sobrepoblación debido a retrasos o a la falta de trenes que satisfagan la demanda de pasajeros en los horarios de mayor movimiento; estos operan a la máxima capacidad permitida, siendo necesaria la expansión de las líneas más críticas.

Comparando la media de la evaluación del usuario (Tabla 4) para la clasificación y eficiencia de las estaciones, en Sé el número de estrellas promedio (4.3) es mayor que en la estación Constitución (3.1). Los principales comentarios negativos de las estaciones Sé y Constitución están dirigidos a la limpieza y seguridad; sin embargo, la estación Constitución tiene los mayores porcentajes de quejas, siendo las de limpieza el 60% y seguridad el 23%, en comparación con Sé, donde las quejas de limpieza son el 42% y de seguridad el 16%; por lo tanto, la frecuencia de estas críticas es mayor para la estación Constitución en Buenos Aires.

La integración modal también es un factor positivo de mayor destaque para la estación Sé (15%) y Constitución (12%). Es posible identificar que la tendencia de los usuarios al evaluar esta estación en São Paulo, a pesar de la incomodidad de la sobrepoblación o la inseguridad del lugar, es valorar más la eficiencia del transporte, en cuanto a la puntualidad y la disponibilidad de trenes en el uso del metro. Esto explica que la media en conectividad sea mejor, sin embargo, con relación al confort sea peor (38%). En cambio, los usuarios de la estación Constitución tienden a clasificar la estación basándose en la infraestructura ofrecida, como la limpieza del lugar y las condiciones de los trenes. El mayor porcentaje de críticas también incluye la puntualidad del transporte (65%), destacando largos intervalos entre los trenes, lo que es el principal factor generador de la aglomeración de los vagones y plataformas.

La percepción negativa de los usuarios en relación con la aglomeración, la demora y la falta de mantenimiento (según se identificó en el análisis de sentimientos) no son solo problemas de confort; son indicadores directos de cuellos de botella e ineficiencias en los procesos operativos del sistema ferroviario subterráneo. Por ejemplo, la sobrepoblación sugiere una gestión ineficaz de la capacidad y de los flujos de pasajeros, mientras que la falta de mantenimiento impacta la disponibilidad de los activos y la confiabilidad del servicio, necesitando optimización en la programación de trenes, mantenimiento preventivo y planificación de infraestructura para mejorar la fluidez y la utilización de los recursos existentes.

Con base en las principales críticas de los usuarios de la estación Constitución en Buenos Aires, es posible identificar que para mejorar el transporte para los pasajeros es necesario invertir urgentemente en limpieza, accesibilidad, establecer metas para reducir los intervalos, invertir en flotas y establecer una planificación integrada con autobuses y trenes para mitigar la sobrepoblación; lo mismo aplica a la estación Sé en São Paulo, debiendo priorizar principalmente operaciones intermodales en horarios de uso críticos, con el fin de atender la demanda poblacional de pasajeros.

En resumen, este estudio demuestra cómo el análisis de la percepción de los usuarios, a través del Contenido Generado por Usuarios, proporciona perspectivas críticas para la optimización de la gestión operacional, la calidad del servicio y la ergonomía de los sistemas ferroviarios subterráneos. Partiendo del principio de que, al identificar puntos críticos y oportunidades de mejora a partir de la voz del cliente, las entidades responsables pueden dirigir esfuerzos hacia intervenciones estratégicas que resulten en una gestión más eficiente en las operaciones de los subterráneos.

Este estudio refuerza la agenda global de sostenibilidad a través de los conocimientos obtenidos por el análisis de la voz de los usuarios en São Paulo y Buenos Aires, especialmente para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 9 y 11 de la ONU. Al señalar dónde la infraestructura, el mantenimiento y la eficiencia de los subterráneos pueden mejorar, este estudio ayuda a construir infraestructuras más fuertes y de mejor calidad (ODS 9), incentivando la innovación en la gestión. Del mismo modo, al identificar problemas en accesibilidad, seguridad y confort, la investigación apoya el desarrollo de sistemas de transporte más seguros, accesibles y sostenibles (ODS 11). Con esto, este artículo sirve como un apoyo fundamental para la búsqueda de sistemas urbanos más eficientes y orientados a las personas.

Como limitaciones del estudio, cabe destacar: (1) el potencial sesgo inherente a la utilización de datos de Google Maps como fuente primaria; (2) la posible divergencia entre las percepciones registradas por turistas y la experiencia cotidiana de los usuarios locales; (3) la ausencia de triangulación metodológica con otros enfoques, como observaciones sistemáticas o análisis de contenido visual, que podrían enriquecer los hallazgos; y (4) el factor humano presente en la interpretación de los análisis de sentimientos y manejo de la Inteligencia Artificial.

De esta forma, el presente artículo cumplió integralmente sus objetivos: realizó la recopilación y el análisis de las evaluaciones de Google Maps, revelando las principales quejas y los problemas de infraestructura percibidos por los usuarios. Esto permitió demostrar el nivel de prestación de servicio de las empresas ferroviarias de subterráneos y proporcionó una base de datos concreta para identificar patrones, sugerir mejoras y reducir cuellos de botella operacionales, contribuyendo a un sistema de transporte más eficiente, seguro y confortable.

## 6. REFERENCIAS.


Brissa, R. O., Gomes, S. C., Tobias, M. S. G., Cabral, E. R., Oliveira, F., Duarte, A. L., & Fiedler, L. C. P. (2022). *Desigualdad social y movilidad urbana*: El caso de Santarém - Brasil (1ª ed.). Editora Científica Digital. https://doi.org/10.37885/220709471

Bussab, W. O., & Morettin, P. A. (2010). *Estadística básica* (6ª ed.). Saraiva.

Chakriswaran, P., Vincent, D. R., Srinivasan, K., Sharma, V., Chang, C.-Y., & Reina, D. G. (2019). Emotion AI-driven sentiment analysis: A survey, future research directions, and open issues. *Applied Sciences*, *9*(24), 5462. https://doi.org/10.3390/app9245462

DeepSeek. (2024). *DeepSeek-V3* [Modelo de lenguaje grande]. https://chat.deepseek.com/

Feijoo, A. M. L. C. (2010). *Medidas de tendencia central*. En La investigación y la estadística en la psicología y la educación (págs. 14–22). Centro Edelstein de Investigaciones Sociales. http://books.scielo.org

Google. (2025). *Política de Contenido Generado por el Usuario de Google Maps*. https://support.google.com/contributionpolicy/answer/7422880

Google Help. (2025). *Centro de ayuda en el perfil de la empresa en Google*. https://support.google.com/business/thread/289849377

Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. (2025). *Banco de datos de pasajeros por molinete y estación, de todas las estaciones de la red de metro*. https://data.buenosaires.gob.ar/dataset/?q=molinetes

Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. (2023). *Reporte anual de transporte 2023*. https://www.buenosaires.gob.ar/transportes

Gobierno del Estado de São Paulo. (2024). Metro de São Paulo. *Indicadores*. https://transparencia.metrosp.com.br/dataset/demanda/resource/269262d7-b753-453e-9073-1e0b42015244

Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE). (2022). *Ciudades y estados*: São Paulo. https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-paulo.html

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). (2022). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022*. https://censo.gob.ar/

IPCC. (2021). *Cambio climático 2021*: Las bases científicas físicas. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf

Kopsidas, A., & Kepaptsoglou, K. (2022). Identificación de estaciones críticas en un sistema de metro: Un análisis de red compleja sustituto. Physica A: *Statistical Mechanics and its Applications*, 596, 127123. https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127123

Krumm, J., Davies, N., & Narayanaswami, C. (2008). Contenido generado por el usuario. *IEEE Pervasive Computing*, *7*(4), 10–11. https://doi.org/10.1109/MPRV.2008.85

Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. (2003). *Fundamentos de metodología científica* (5ª ed.). Atlas.

Nações Unidas Brasil. (2022, 1 de julio). *ONU-Habitat*: La población mundial será 68% urbana hasta 2050. https://brasil.un.org/pt-br/188520-onu-habitat-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-ser%C3%A1-68-urbana-at%C3%A9-2050

Metrô São Paulo. (2023). *Informe de demanda 2023*. Companhia do Metropolitano de São Paulo. https://www.metro.sp.gov.br/dados-abertos

Rocha, F. U. S., & Ramos, M. C. P. (2018). *Modelos de gestión del transporte público urbano de pasajeros*: Las experiencias de las ciudades de Oporto (Portugal) y Salvador (Brasil). En Los problemas generales del espacio europeo (págs. 336–349). Facultad de Letras de la Universidad de Oporto. https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/120861/2/339848.pdf

Subterráneos de Buenos Aires. (2024). *Estadísticas de transporte subterráneo*. https://www.buenosaires.gob.ar/subte

SPUrbanismo. (2024). *Movilidad urbana en la RMSP*. Secretaría Municipal de Urbanismo. https://www.prefeitura.sp.gov.br/urbanismo

Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Inteligencia artificial y análisis de sentimientos: Una revisión de investigación competitiva. *Computers*, *12*(2), 37. https://doi.org/10.3390/computers12020037

United Nations. (s.f.). *Desarrollo sostenible*: Los 17 objetivos. https://sdgs.un.org/goals

Vasconcellos, E. A. (2017). *Movilidad urbana y ciudadanía*. Editora Senac São Paulo.

World Population Review. (2025). *Poblaciones de ciudades del mundo*. https://worldpopulationreview.com/world-cities

Ying, C., Chow, A. H. F., Nguyen, H. T. M., & Chin, K. (2022). Aprendizaje por refuerzo profundo multiagente para operaciones adaptativas coordinadas de servicio de metro con composición de trenes flexible. *Transportation Research Part B: Methodological*, 161, 36–59. https://doi.org/10.1016/j.trb.2022.05.001

Zhang, Z., Chai, H., & Guo, Z. (2023). Evaluación cuantitativa de la resiliencia de la respuesta del servicio de metro a nivel de red a la pandemia de COVID-19. *Sustainable Cities and Society*, 89, 104315. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104315

# MEJORA DE LA GESTIÓN DE STOCKS EN UN RESTAURANT MEDIANTE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO Y OPTIMIZACIÓN VÍA SIMULACIÓN

Baquela, Enrique Gabriel; Virginia Javiera Vazquez;

*Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional.*
*ebaquela@frsn.utn.edu.ar; vvazquez@frsn.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

La gestión de inventarios en restaurantes presenta dificultades propias del rubro, no comúnmente encontrada en otros sistemas de inventarios, como alta fluctuación de la demanda, rápida perecibilidad de los productos almacenados, pérdidas de ventas ante faltantes y otras restricciones logística. En este trabajo se propondrá un modelo de optimización de la gestión de inventarios que, haciendo uso de simulación y aprendizaje automático, permita determinar políticas de gestión que disminuyan los costos de stock y mejoren la tasa de servicio al cliente. Para ello, partiendo de datos históricos, se modelará mediante aprendizaje automático la demanda de los productos finales y se estimará la demanda de los ingredientes. Con dicho modelo, se evaluarán diferentes políticas en un simulador, en un proceso automático, embebiendo el modelo de predicción dentro de la simulación y utilizando a esta última como un modelo de caja negra a optimizar.

**Palabras Claves:** inventario; simulación; aprendizaje automático; optimización; restaurante

**ABSTRACT**

Inventory management in restaurants involves challenges specific to the sector that are uncommon in other inventory systems—such as highly volatile demand, rapid perishability of stored items, lost sales due to stockouts, and additional logistical constraints. This paper proposes an optimization framework for inventory management that leverages simulation and machine learning to determine operating policies that reduce stock-related costs and improve customer service levels. Using historical data, we first model the demand for finished products via machine learning and then infer the resulting demand for ingredients. We then evaluate alternative policies within a simulator in an automated process, embedding the predictive model inside the simulation and treating the simulator as a black-box function to be optimized.

**Keywords:** inventory; simulation; machine learning; optimization; restaurants

## 1. INTRODUCCIÓN

Muchos restaurantes operan en un entorno de fuerte incertidumbre. Sus inventarios son altamente volátiles y perecederos. Muchos factores se combinan para hacer que la gestión clásica de inventarios, los modelos de libros, sean inaplicables: la demanda es fluctuante (con patrones semanales, estacionales y otras escalas de tiempo superpuestas; también son afectadas por factores como el clima), los productos tienen una vida útil corta, distintos proveedores tienen plazos de entrega distintos, hay mínimos de compra y oferta por compra por cantidad, ante quiebres de stocks las ventas no se recuperan, entre otras cosas. Sumado a eso, la demanda es compuesta: un producto es, en realidad, un conjunto de ingredientes definidos por una receta (BOM) y sujeto a mermas en el proceso de preparación.

Una política de gestión de inventarios muy utilizada en restaurantes es la de periodo de revisión fijo (R,S), es decir, revisar el stock cada R días y pedir lo necesario para subir el stock hasta S. La política es simple, permite estandarizar las operaciones de compra y recepción de ingredientes, y en general se acoplan con la modalidad de venta y entrega de los proveedores (levantan pedidos N veces a la semana, entregando a posteriori). Si bien hay mucho desarrollo en la literatura sobre este tipo de políticas, en la realidad estos métodos se vuelven ineficientes y poco robustos dadas las particularidades propias de los restaurantes explicadas anteriormente.

En este trabajo se propone un enfoque basado en la explotación de datos históricos para la obtención de políticas (R,S) ajustadas a la realidad operativa del restaurante. A partir de ventas históricas por plato, primero se generan pronósticos de demanda de platos y luego se traducen a demanda de ingredientes mediante la BOM y mermas. Con esas trayectorias se ejecuta un simulador diario que rastrea lotes por edad y aplica FEFO (el primero que expira es el primero que sale), contabilizando vencimientos y costos. Sobre este simulador, tratamos la política como una caja negra a optimizar: se evalúan candidatos de S (con R dado) y se seleccionan aquellos que minimizan el costo esperado bajo un nivel de servicio (tasa de servicio) objetivo.

Las contribuciones de este trabajo son principalmente dos:

1. Un esquema algorítmico de optimización (Pronosticar → Traducir → Simular → Optimizar) que modela explícitamente perecederos, ventas perdidas, MOQ y lead times por ingrediente.
2. Un esquema de comparación usando baseline cuantílico, extrapolable a futuros trabajos.

Las preguntas de investigación que guían el estudio son:

1. ¿En qué medida una política (R,S) optimizada sobre simulación reduce el costo total (holding, desperdicio, pedidos y ventas perdidas) respecto de un baseline cuantílico al mismo nivel de servicio?
2. ¿Cómo se comporta el trade-off costo–servicio usando la metodología propuesta respecto de la versión cuantílica?

Este trabajo representa la etapa inicial, exploratoria, de un proyecto mayor, en el cual se modelará la complejidad de la toma de decisiones en forma mas cabal. Sin embargo, se destaca la transferibilidad del enfoque propuesto: la política (R,S) resultante es operativamente simple (revisión periódica y “subir-hasta”), mientras que su calibración se automatiza con datos y simulación. Esto facilita pasar de un “cálculo de aula” a una herramienta de decisión que incorpora realidades del rubro y se adapta semana a semana a nuevos patrones de demanda. En las secciones siguientes detallamos el marco metodológico, los experimentos y resultados, y discutimos lineamientos para adopción en producción.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Existe mucha literatura en lo que respecta a políticas de inventarios. Los modelos mas tratados y difundidos, tanto por su interpretabilidad como su simplicidad práctica y operativa son los modelos de revisión periódica (R,S), los de punto de reorden (s,S) y variantes de los mismos bajo demanda estocástica, posibilidad de faltantes, descuentos por cantidad y entregas progresivas, entre otros (Zipkin, 2000; Hillier & Lieberman, 2010; Sharma & Vrat, 2018).

Cuando los artículos son perecederos, la literatura presenta modelos más complejos, en los que correcciones por edad y horizonte remanente se incluyen dentro de la política de inventarios, así como costos por desperdicios, recurriéndose en ocasiones al uso de simulaciones para modelar el comportamiento FEFO (First Expired, First Out, el que está más próximo a caducar sale primero,

primero en salir) para evaluar la calidad de la política (Nahmias, 1982; Chaudhary, 2018). Modelar explícitamente la edad de cada lote, así como guiar la rotación de artículos por fecha de caducidad reduce mermas y mejora la calidad percibida (Hertog et. Al, 2014).

En restaurantes, la demanda física es de ingredientes acoplados por la receta (BOM) y afectados por mermas de preparación; múltiples trabajos aplicados discuten la integración de POS (puntos de venta) en tiempo real con inventarios, y los beneficios en reducción de quiebres y desperdicio al cerrar el bucle pronóstico → compra→consumo (Gill, 2021, Sasikanth & Krithika, 2024).

Las políticas en inventarios de productos perecederos con lead times heterogéneos, entregas mínimas y ventas perdidas rara vez admiten fórmulas cerradas; por ello, la optimización vía simulación es estándar en problemas con varias fuentes de no linealidad y/o estocasticidad (Fu, 2015; Barton, 2020). Estudios recientes en alimentos perecederos emplean simulación basada en eventos discretos y búsqueda mediante metaheurísticas para ajustar parámetros de reaprovisionamiento bajo demanda variable y horizonte multi-día, mostrando mejoras significativas respecto de las reglas analíticas puras (Xue, 2019; Gioia et. al., 2023).

## 3. METODOLOGÍA PROPUESTA

El enfoque propuesto integra cuatro etapas: pronosticar la demanda de platos, traducir la demanda de platos a demanda de ingredientes, simular el sistema y optimizar los parámetros de la política sobre el simulador.

### 3.1. Pronóstico de demanda

A fin de pronosticar la demanda, se debe contar con un histórico de ventas por productos. En la gestión de restaurantes ya es común el uso de sistemas POS integrados, que permiten obtener un detalle de cada consumición. En base a este histórico, ampliándolo con información etiquetada manualmente (por ejemplo, para declarar promociones), es posible ajustar un modelo de serie de tiempos mediante aprendizaje automático, que nos permita calcular, para cada producto final, la demanda de corto plazo (una o dos semanas).

### 3.2 Traducción a demanda de ingredientes

Para la traducción de demanda de productos a demanda de ingredientes en necesaria una matriz de ingrediente-producto, con estimación de mermas. Haciendo una “explosión” de cada producto en sus ingrediente, afectando estos últimos por la demanda diaria los primeros, y luego consolidando los resultados por día e ingrediente, podemos tener un pronóstico de demanda de cada uno de los ingredientes.

### 3.3 Simulación

El simulador implementado es un simulador de tiempo discreto, de avance diario, que simula las entradas y salidas de cada ingrediente, monitoreando el envejecimiento de cada lote. En cada paso de tiempo, en simulador realiza las siguientes operaciones:

- Establece el stock inicial de ingredientes igual al stock final previo
- Agrega al stock los arribos de ingredientes
- Compara la demanda de ingredientes del periodo actual con el stock:
    - Si la demanda es menor o igual al stock para todos los ingredientes, disminuye el stock de ingredientes, quitando primero los de fecha de caducidad mas cercana.
    - Si la demanda es mayor para al menor un componente, arma lotes de producto muestreando al azar y disminuye el stock de ingredientes en las cantidades que realmente se pueden comercializar, quitando primero los de fecha de caducidad mas cercana.
- Chequea todos los lotes de ingredientes para determinar si alcanzaron su fecha de caducidad. Si alguno la alcanzó, lo remueve del stock.
- Establece el stock al final del día
- Si estamos en un día de pedido, hace los pedidos para alcanzar la cantidad S en cada ingrediente y los agrega a la lista de pedidos

### 3.4 Optimización

Para un R fijo, buscamos el S que minimice el costo esperado de compra sujeto a una restricción de servicio mínimo. El optimizador está implementado mediante un algoritmo de optimización de partículas (PSO), en el cual se intenta minimizar la siguiente función objetivo:

*Costo total = Costo de Compra + Costo de mantener + penalización por faltante + penalización por descarte*

La evaluación de la función objetiva se realiza mediante la ejecución de una corrida del simulador, el cual recibe como inputs tanto la proyección de demanda, como el valor de R y la propuesta de valores de S generadas por el optimizador. Como resultado, devuelve el costo total, que luego es utilizado por el optimizador para, en la siguiente iteración, generar nuevos valores de S. Como única restricción, implementada a modo de penalización en la función objetivo, tenemos el faltante de producto. Este penalización es igual a:

- El cuadrado el ingreso total perdido por el faltante, cuando la tasa de servicio es menor al 95%
- Cero si la tasa de servicio es mayor o igual al 95%

Los parámetros del PSO de determinaron mediante un esquema de experimentación, definiendo los siguientes valores:

- Tamaño de población: 50
- Criterio de corte: 150 iteraciones / 5 iteraciones sin cambios
- Inercia: 0,5
- Coeficiente individual: 2,15
- Coeficiente social: 2,75
- Velocidad: 0,35

## 4. EXPERIMENTOS

Usamos ventas diarias por plato, BOM/recetas (insumo por plato y merma de preparación), parámetros de compra (lead time, MOQ, costos fijo/variable), parámetros económicos (holding, desperdicio, ventas perdidas) y vida útil por ingrediente. Se tomó un subconjunto de los productos ofrecidos (los 10 de mayor demanda) a modo de prueba. En base a los datos de la demanda, se construyeron datasets sintéticos parciales (es decir, variando la ventana de adquisición de datos) configurando estos los escenarios de prueba.

Para el mismo set de features se probaron dos algoritmos de predicción, una regresión lineal y un random forest.

Como dataset de baseline, se compararon los resultados contra de la política de mantener un stock de ingredientes calculado mediante BOM para satisfacer el cuantil 95 de demanda de cada producto, usando los periodos de reorden vigentes actualmente.

Se tomaron 4 semanas como horizonte de predicción y operación

## 5. RESULTADOS

Respecto del método de predicción utilizado, la Tabla 1 nos muestra los rangos de variación del error cuadrático medio porcentual para los dos algoritmos propuestos, notándose claramente una superioridad del algoritmo de Random Forest. Si bien estamos prediciendo serie de tiempo, debido a que el comercio ya está establecido y tiene una demanda estable, y que la predicción es a corto plazo, los efectos de tendencia (donde mas valor se podría haber sacado de la regresión) no influyen demasiado, Siendo las distintas estacionalidades mas influyentes en la predicción.

*Tabla 1 Distribución del error cuadrático medio porcentual de la predicción*

| Algoritmo | Mínimo de error cuadrático porcentual | Media de error cuadrático porcentual | Máximo de error cuadrático porcentual |
|---|---|---|---|
| Regresión Lineal | 8,4% | 14,1% | 23,8% |
| Random Forest | 5,3% | 9,7% | 16,4% |

La Tabla 2 compara los costos totales arrojados por la política propuesta por el optimizador contra los resultados encontrados simulando la política basada en cuantiles. Se puede ver que, si bien tiene todavía margen de mejora, se puede observar como la política propuesta por el algoritmo es superior en términos de costos. Respecto del tasa de servicio, los resultados son similares, pero indican que podría mejorarse el trade-off respecto de costos en el algoritmo de OvS.

*Tabla 2 Comparación entre política OvS y política cuantílica (valores medios)*

| Método | tasa de servicio (100% implica que se satisface la totalidad de demanda) | Costo total (se toma como 100% el resultado de la política cuantílica) |
|---|---|---|
| OvS | 95,3% | 83,2% |
| Quartiles | 96,7% | 100% |

## 6. LIMITACIONES

El trabajo presentado, parte de un estudio mayor todavía en sus etapas iniciales, presenta algunas limitaciones importantes. Primero, el entrenamiento inicial del modelo, se realizan sobre datos de ventas, no de demanda. Segundo, el esquema general se basa en optimizar contra el promedio de dichas ventas, lo cual lo vuelve poco robusto ante cambios en la demanda. En tercer lugar, no se toman en cuenta restricciones del tipo económico ni de espacio de almacenaje. En cuarto lugar, los costos de almacenaje, así como los leadtime y las fechas de expiración se consideraron como factores determinísticos, es necesario o considerarlos en su faz aleatoria.

## 7. CONCLUSIONES

Se presenta aquí un primer modelo exploratorio para optimización de políticas de inventario en un restaurante basada en Optimización vía Simulación y algoritmos de aprendizaje automático. Los resultados son promisorios, ya que el esquema básico permite lograr buenos resultados en términos de tasa de servicio y costos.

El presenta trabajo genera varias líneas sobre las que trabajar en el futuro:

- Comparación de diversas metaheurísticas.
- Adición de restricciones del tipo capacidad.
- Mejora en la predicción de la demanda
- Mejora en la robustez de las decisiones.
- Tratamiento multiobjetivo de los costos y la tasa de servicio.

El esquema básico es extrapolable a estos futuros trabajos, permitiendo tener un framework relativamente estable para continuar la investigación.

## 8. REFERENCIAS.


Barton, R. R. (2020). Tutorial: Metamodeling for simulation (actualiza el estado del arte). Winter Simulation Conference. https://informs-sim.org/wsc20papers/133.pdf

Chaudhary, V. Kulshrestha, R., Routroy, S. (2018). State-of-the-art literature review on inventory models for perishable products. Journal of Advances in Management Research, 15 (3), pp.306–346. https://doi.org/10.1108/JAMR-09-2017-0091

Fu, M. C. (2015). Handbook of Simulation Optimization. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-1384-8

Gill, A. (2021). Optimizing restaurant inventory management using real-time data. International Journal of Core Engineering & Management, 6 (12).

Gioia, D. G., Felizardo, L. K., Brandimarte, P. (2023) Simulation-based inventory management of perishable products via linear discrete choice models. Computers and Operations Research, 157. https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106270

Hertog, M. L., Uysal I., McCarthy, U., Verlinden, B. M., Nicolaï, B.M. (2014). Shelf life modelling for first-expired-first-out warehouse management. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 372(2017):20130306. doi: 10.1098/rsta.2013.0306.

Hillier, F. S., Lieberman, G. J. (2010). Introducción a la Investigación de Operaciones 9na edición. Mc Graw Hill. ISBN: 978-607-15-0308-4

Sasikanth, M., Krithika, D. R. (2024). Restaurant Inventory Management System. International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 4 (6). 10.48175/IJETIR-1217

Sharma, N., Vrat, P. (2018). Inventory models with stock-dependent demand: a comprehensive review and its linkage with waste management. International Journal of Inventory Research, 5 (2), pp. 112-152. https://doi.org/10.1504/IJIR.2018.093804

Xue, N., Landa-Silva, D., Figueredo, G. and Triguero, I. (2019). A Simulation-based Optimisation Approach for Inventory Management of Highly Perishable Food. In Proceedings of the 8th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES 2019), pages 406-413. ISBN: 978-989-758-352-0. DOI: 10.5220/0007401304060413

Zipkin, P. H. (2000). Foundations of Inventory Management. McGraw-Hill series in operations and decision sciences. McGraw-Hill. ISBN: 978-007-11-8315-4

# PICK TO LIGHT: SISTEMA DE PICKEO EFICIENTE A BAJO COSTO

Davis, Federico; Romero, Santiago; Iorio, Franco

*Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo*
fdavis@frh.utn.edu.ar
sromero@frh.utn.edu.ar
fiorio@frh.utn.edu.ar

**RESUMEN**

Se presenta el desarrollo de un sistema "pick to light" de bajo costo, diseñado por el laboratorio de Métodos y Tiempos de ingeniería industrial UTNFRH con el propósito de optimizar la preparación de pedidos en entornos industriales/comerciales y del sector logístico general.

Se fabricó una estantería económica con capacidad matricial de 24 ubicaciones (8 posiciones en 3 niveles de altura), utilizando bines plásticos, que facilitan el acceso a los materiales. En colaboración con el Laboratorio de Electrónica, se implementó un sistema basado en un módulo ESP 32, LEDs y pulsadores, permitiendo la identificación rápida de productos. Además, se desarrolló una aplicación para Android que escanea el código de barras del pedido del cliente (o secuenciado/prearmado) y luego, a través de una conexión bluetooth se comunica con el módulo electrónico, vinculando software y hardware.

Basándose en el conocimiento sobre la ubicación de los materiales en dicha estantería matricial, este sistema genera la secuencia más eficiente que guía al operador para la recolección de productos, minimizando recorridos, tiempos y costos, al mismo tiempo que reduce la posibilidad de errores en la selección.

Este desarrollo tecnológico de bajo costo mejora el tiempo total de la operación logística y permite reducir significativamente la posibilidad de error y mejorar la seguridad de máquinas en procesos personalizados, continuos o por lotes, brindando mayor eficiencia operativa y satisfacción del cliente.

**Palabras Claves:** Pick to light, Logística, Eficiencia, Sustentabilidad.

**ABSTRACT**

**Keywords:**

## 1. INTRODUCCIÓN

La coyuntura actual del e-commerce tiene en su génesis la venta por catálogo en los años 20 y 30 del siglo XX. Sin embargo, el inicio de lo que hoy conocemos como comercio electrónico experimentó como herramienta disruptiva el Electronic Data Interchange (EDI), que permite la transmisión electrónica de órdenes de compra y facturas entre proveedor y cliente.

Alineado con los cambios de plataforma, las necesidades y el comportamiento de los consumidores han sufrido variaciones y evoluciones a lo largo del tiempo, aceleradas en la última época por la pandemia y la globalización. En la actualidad, los clientes exigen entregas rápidas, flexibles y confiables. Los consumidores priorizan tiempos de entrega cortos (mismo día o, a lo sumo, al día siguiente) y opciones como los puntos de recogida ("pick-up points").

Esta combinación de factores hace que la "última milla" — la última parte del proceso de entrega de un pedido — sea tan importante que afecta directamente la percepción de la marca y la fidelización del cliente. Además, siendo tan determinante en los costos logísticos totales, aún no se ha encontrado la fórmula ideal para optimizar este trayecto, ya que implica múltiples paradas, distancias variables y problemas de tránsito urbano, entre otros.

Uno de los pilares para que la última milla sea lo más eficiente posible es la preparación previa en el almacén, ya que una correcta gestión del pedido en esa etapa es fundamental para asegurar condiciones óptimas durante el tránsito hacia el cliente. Esta actividad es conocida como picking. El picking consiste en la actividad de preparación de pedidos, que implica la recogida y el ensamblaje de productos unitarios para conformar un pedido. Si no se realiza de manera adecuada, el proceso pierde coherencia: se generan errores, retrabajos o incluso la imposibilidad de avanzar. En cambio, cuando se ejecuta correctamente, permite crear una base sólida que optimiza tiempos, reduce fallos y garantiza que los resultados finales cumplan con los estándares de calidad.

En definitiva, el picking no es solo una tarea más dentro del almacén; es una estrategia diseñada meticulosamente para asegurar que los productos correctos sean seleccionados y preparados para su envío de manera precisa y eficiente. Las acciones clave para lograr un picking eficiente son:

- Codificación de los artículos
- Ubicación de cada producto
- Cartografía dentro del almacén
- Sectorización ajustada
- Optimización de las rutas

Adicionalmente, en un mundo donde la sostenibilidad se ha convertido en un pilar fundamental para las operaciones empresariales, el proceso de picking en la logística permite minimizar el impacto ambiental de las actividades de distribución y almacenamiento. La eficiencia en el picking se traduce no solo en una operación más ágil y económica, sino que también contribuye significativamente a reducir la huella de carbono, mediante la simplificación de los trayectos, la menor generación de residuos, la disminución de errores en la selección y empaquetado de pedidos, así como la reducción de reenvíos y devoluciones, entre otros beneficios.

Para realizar la actividad de recogida, inicialmente se utilizaron sistemas manuales y sencillos: los operarios recorrían las estanterías con listas impresas en una mano, recogiendo productos de manera directa con la otra. A medida que fue necesario mejorar las cualidades del picking y ampliar la variedad de artículos, se incorporaron estrategias como el picking por lotes (recoger varios pedidos simultáneamente) y el picking por zonas (cada operario se encarga de un sector del almacén), buscando reducir recorridos y tiempos.

Con la llegada de la tecnología, el picking evolucionó hacia métodos más eficientes, apoyados en sistemas de gestión de almacenes (WMS), radiofrecuencia y códigos de barras. Posteriormente, la automatización trajo soluciones como el pick to voice, pick to light, además de la incorporación de sistemas robotizados (vehículos AGV).

En particular, el sistema pick-to-light comenzó a desarrollarse a mediados de los años 90, evolucionó desde rudimentarios sistemas de luces hasta soluciones avanzadas con pantallas LED que indican tanto la ubicación como la cantidad de productos a recoger. Esta evolución ha permitido mejorar la accesibilidad y reducir costos operativos en entornos logísticos. Empresas como Amazon, Walmart y Zara han implementado esta tecnología para optimizar la eficiencia en sus centros de distribución, adaptándose rápidamente a cambios en la demanda y aumentando la flexibilidad en la gestión de

inventarios. Sin embargo, estos métodos tecnológicos de pickeo poseen como principales desventaja el alto costo de implementación y la flexibilidad ante los cambios.

| | RF Scanning | Visual Logistics | Pick to Light | Voice Technology |
|---|---|---|---|---|
| Productivity Speed | ★★ | ★★★ | ★★★★★ | ★★★★ |
| Accuracy | ★★★ | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ |
| Data Capture Capability | ★★★★★ | ★★★★★ | ★ | ★ |
| Flexible Multi-Functional Capability | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★ | ★★ |
| Hands Free | ★ | ★ | ★★★★ | ★★★★★ |
| System Cost | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★ | ★★★ |

*Figura 1.Comparativa entre los diferentes métodos de picking (Sitthikarn, Hakimi, & Chuanasa, 2015)*

## 2. OBJETIVO

El objetivo del trabajo es diseñar y replicar un sistema de pickeo con luces (pick-to-light) que sea funcional y de bajo costo, garantizando al mismo tiempo que sea un sistema abierto. Actualmente, el sistema debe contar con capacidad para 24 posiciones. Además de sus características de flexibilidad y funcionalidad, la aspiración es que el sistema sea escalable y modular, de manera que pueda ampliarse tanto en su estructura como en aspectos electrónicos.

De manera suplementaria, se permite evaluar e identificar empíricamente los beneficios aparejados a dicha aplicación respecto a los métodos tradicionales de recogida de pedidos, amparados bajo un entorno educativo de la Ingeniería desarrollado en la facultad UTN FRH, donde se promueven las competencias de diseñar, proyectar, modelar y planificar mejoras operacionales relacionados al proceso de preparación de una orden dentro de un entorno industrial además de formular y evaluar el nivel de optimización que producen notar las nuevas tendencias del mercado.

## 3. DESARROLLO

### 3.1 Construcción

A continuación, se detallan las tres etapas del proceso: la construcción de la estructura, del sistema electrónico y la creación de una aplicación Android para dar forma al sistema.

El propósito final del sistema es que funcione de la siguiente manera: un operario dispone de una orden de compra (pedido de un cliente), que contiene un código QR. Al escanear dicho pedido mediante una aplicación móvil, los LEDs correspondientes a los ítems se encenderán en la estantería, y la pantalla LCD indicará cuál es el ítem a tomar. Los botones se utilizan para avanzar al siguiente elemento hasta completar el pedido. Una vez finalizado, en el LCD se mostrará el tiempo total empleado y se emitirá una señal sonora.

El desplazamiento dentro del almacén se realizará siguiendo un recorrido con sentido de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, con el fin de optimizar el recorrido. El operario utilizará uno de sus sentidos en busca de alcanzar una ventaja competitiva y mayor eficiencia.

#### 3.1.1 Construcción de la estantería

Partiendo de un diseño sustentado en los principios del diseño industrial, se llevó a cabo el proyecto de la estructura de la estantería. El planteamiento inicial consideró tanto la optimización del espacio como la resistencia mecánica del sistema, de manera que se pudiera garantizar funcionalidad, durabilidad y seguridad en el uso cotidiano.

La estantería fue concebida con 24 posiciones de almacenamiento, organizadas en una matriz de 8 filas por 3 columnas, alcanzando unas dimensiones totales de 3 metros de largo, 60 cm de profundidad y 1,6 metros de altura máxima. Estas medidas se definieron con el propósito de lograr un equilibrio entre la capacidad de almacenamiento, la ergonomía de acceso y la estabilidad estructural.

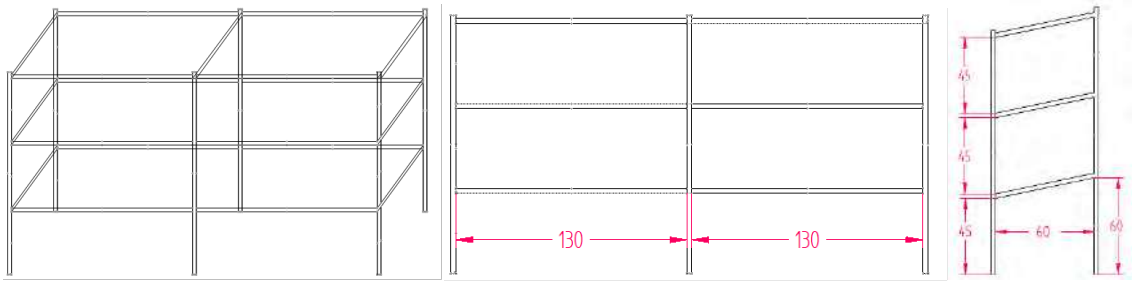



*Figura 2.Diseño de la estantería medida en cm (de izquierda a derecha: Estantería, vista frontal, vista lateral)*

Para la base estructural se seleccionaron tubos de hierro de 27 mm de diámetro y 4 metros de largo, materiales que ofrecen una elevada relación resistencia-peso y garantizan una adecuada capacidad portante frente a cargas distribuidas. Estos elementos fueron cortados a medida conforme a los requerimientos dimensionales del proyecto.

Posteriormente, se incorporaron accesorios conectores metálicos normalizados que permitieron un ensamblaje preciso y seguro, facilitando la unión rígida entre los distintos componentes. De esta manera, se consolidó una estructura modular, estable y adaptable, con potencial para futuras modificaciones o ampliaciones.

En una segunda instancia, se llevó a cabo el diseño de tubos para el posterior agregado de cableado. Estos tubos de PVC, que ofrecerán una protección adecuada al cableado frente a factores ambientales y mecánicos, poseen un diámetro de 20 mm y una longitud similar a la de la estantería, respondiendo a criterios de manipulación y costo económico.



*Figura 3.Estantería armada con sistema Pick to Light incorporado.*

### 3.1.2 Construcción del sistema electrónico

La construcción del sistema electrónico se basa en un ESP32 como microcontrolador principal. A través de registros 74HC595, controla una matriz de 24 LEDs distribuidos en 3 filas y 8 columnas en la estantería. Además, incluye una pantalla LCD 16×2 con interfaz I2C que muestra el ítem a seleccionar y, al finalizar, el tiempo total de armado. Un buzzer complementa la interfaz de usuario con señales sonoras al encender, iniciar y terminar el proceso.

La interacción con el usuario se realiza de dos formas:

- 24 botones físicos, programados con interrupciones, que permiten avanzar paso a paso en el proceso de picking.
- Una aplicación móvil (desarrollada por Ingeniería Industrial) que, mediante Bluetooth, envía al ESP32 los códigos de barras correspondientes a los pedidos.

En conjunto, el proyecto integra hardware electrónico, programación embebida y una interfaz de usuario tanto física como digital, logrando un prototipo funcional, de bajo costo y fácil implementación, capaz de optimizar el proceso de armado de pedidos.

#### 3.1.2.1 Componentes utilizados

- Microcontrolador: ESP32
- Indicadores: LEDs comerciales comunes, color rojo x24
- Pantalla: LCD 16x2 (HD44780 + módulo I2C)
- Sonido: buzzer
- Fuente de alimentación: comercial 220 V a 5V
- Interacción con el usuario
    - 24 pulsadores
    - Aplicación móvil
- Conectividad: Bluetooth entre el celular y el ESP32.
- Software: desarrollado en Arduino, cargado al ESP32.
- Mecánica: estantería y mecanizado de tubos realizados por Ing. Industrial.

#### 3.1.2.2 Fundamentos de los componentes

En el desarrollo de nuestro proyecto, inicialmente se consideró utilizar un Arduino UNO; sin embargo, se descartó esta opción debido a que su capacidad de RAM no era suficiente para manejar la pequeña base de datos de ítems y pedidos. En su lugar, optamos por el ESP32, que ofrece una mayor memoria y conectividad integrada, incluyendo Bluetooth y WiFi, lo que lo convierte en una solución ideal para nuestras necesidades.

Para la gestión de los LEDs, se eligió el circuito integrado 74HC595, que permite reducir costos en comparación con un expansor GPIO u otros componentes integrados. Esta solución es económica y fácil de conseguir, además de que disminuye significativamente la cantidad de pines requeridos por el microcontrolador: 24 pines sin el integrado frente a solo 6 pines con él.La pantalla LCD 16×2, junto con un módulo I2C, se incorporó casi al final del desarrollo para mostrar el nombre del ítem a seleccionar y, al finalizar, el tiempo total de ensamblaje. La inclusión del módulo I2C permitió ahorrar pines del ESP32, optimizando así el diseño del circuito.

Además, se integró un buzzer que proporciona retroalimentación sonora en acciones específicas, como al encender el dispositivo, al iniciar y al finalizar el proceso. Esta característica refuerza la experiencia del usuario, haciéndola más interactiva.

La fuente de alimentación de 220 V a 5 V fue seleccionada por ser rápida, práctica y no requerir la construcción de una fuente propia. Es una opción económica y muy fácil de utilizar.

En cuanto a la interfaz de usuario, se utilizaron botones físicos para permitir la navegación entre ítems y el recorrido del pedido. Aunque esta versión cuenta con 24 botones, eléctricamente funcionan como un solo botón conectado en paralelo, ya que no distingue cuál de ellos está presionado.

Finalmente, se eligió Bluetooth como la forma más sencilla y directa de comunicación entre el teléfono celular y el ESP32. Aprovechando que el ESP32 ya tiene esta funcionalidad integrada, no fue necesario agregar hardware adicional.

El desarrollo del software se realizó en Arduino IDE, una plataforma sencilla y rápida que ofrece un buen soporte para el ESP32, facilitando así el proceso de programación y optimización del sistema.

#### 3.1.2.3 Construcción del sistema

En el diseño inicial, se propuso que cada ítem de la estantería contara con un LED indicador, considerando que los pedidos pueden estar compuestos por múltiples ítems.

Durante la selección de hardware, se decidió reemplazar el Arduino UNO por el ESP32 debido a sus ventajas en memoria y conectividad. Además, se optó por el uso de circuitos integrados 74HC595 por su costo accesible.

La construcción de la estantería se ha detallado previamente, mientras que el montaje eléctrico consistió en cablear los 24 LEDs en una matriz de 3×8, conectándolos a los 74HC595 y al ESP32.En

cuanto a la pantalla y el buzzer, se integraron un LCD 16×2 con módulo I2C y un buzzer. El LCD se encarga de mostrar qué ítem debe seleccionarse y el tiempo total al finalizar el proceso; el buzzer proporciona avisos sonoros al encenderse, al iniciar y al concluir el proceso.

La alimentación del sistema se realiza mediante una fuente comercial que transforma 220 V a 5 V, garantizando un funcionamiento estable.

Para la interfaz de usuario, se configuró un botón físico con interrupciones, así como una aplicación móvil diseñada para escanear códigos de barras y enviar pedidos a través de Bluetooth.

En la fase de programación, se implementaron diversas funcionalidades en Arduino, incluyendo la creación de una base de datos en RAM, el control de los LEDs, la gestión del LCD y el buzzer, la comunicación Bluetooth, y el manejo del botón mediante interrupciones.

Durante las pruebas e integración, se verificó que los LEDs, el LCD, el buzzer, el botón y el Bluetooth funcionaran de manera sincronizada, asegurando un rendimiento óptimo del sistema.

Finalmente, el sistema guía al usuario utilizando los LEDs y mensajes en el LCD, y al culminar el proceso, muestra el tiempo total transcurrido y emite un sonido de confirmación, completando así la experiencia del usuario de forma eficiente y efectiva.

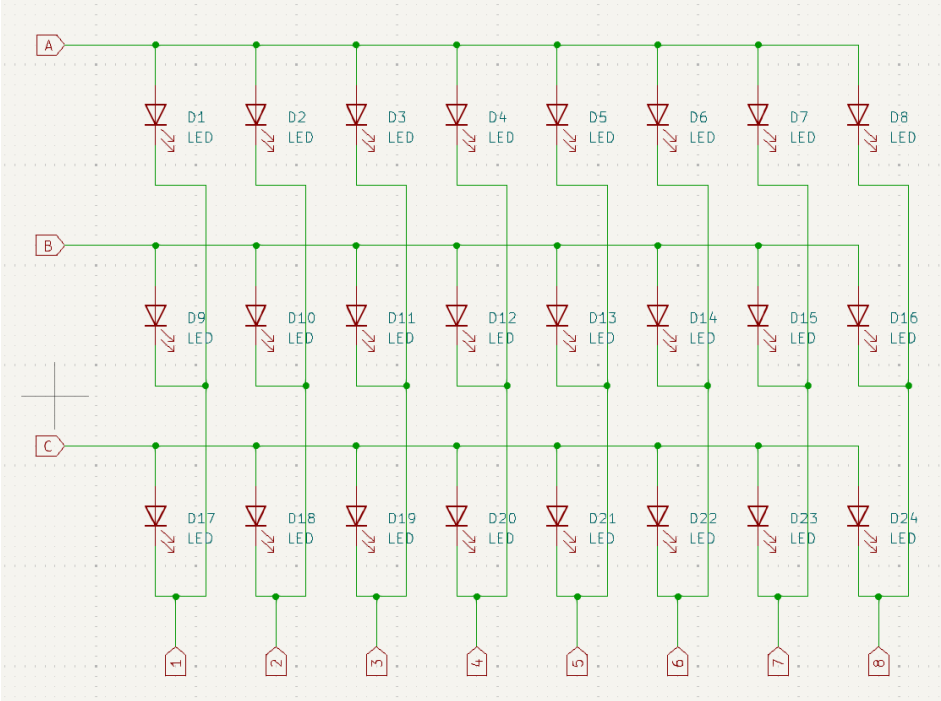



*Figura 4.Esquema eléctrico de la matriz.*

### 3.1.3 Construcción de la aplicación

Para generar la conexión entre el hardware (estantería) y el software (electrónica), se creó una aplicación Android que permite escanear el código de barras de la orden del cliente y, mediante conexión Bluetooth, enviar la orden a la estantería para que esta comience a encender las luces.

La creación de la aplicación se llevó a cabo utilizando App Inventor, una herramienta de programación basada en bloques visuales para Android. La elección de este entorno de desarrollo se debió a que ofrece un desarrollo rápido de aplicaciones móviles, así como una integración sencilla de Bluetooth y escaneo de códigos QR, además de permitir la generación de un archivo .apk listo para instalar en cualquier dispositivo Android. App Inventor no solo facilita la combinación de lectura de códigos QR y transmisión de datos vía Bluetooth sin necesidad de código complejo, sino que también es un entorno visual apto para fines educativos, motivando a los alumnos a desarrollar innovaciones tecnológicas.

Específicamente, la lógica de la programación en bloques se implementó de manera visual en la aplicación.

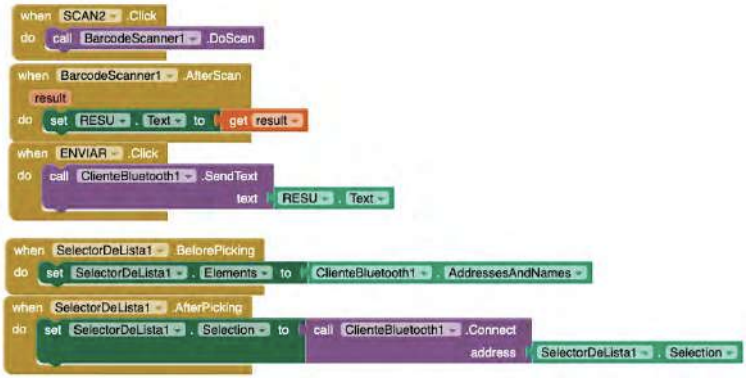



*Figura 5.Lógica de programación*

- SCAN → activa lector QR.
- Código leído → almacenado en campo de texto.
- ENVIAR → transmite vía Bluetooth al módulo HC-05 conectado a la placa de control.
- La placa interpreta los datos y enciende las salidas digitales correspondientes (LEDs).

En paralelo, el diseño de la aplicación replicaba una interfaz clara y funcional.

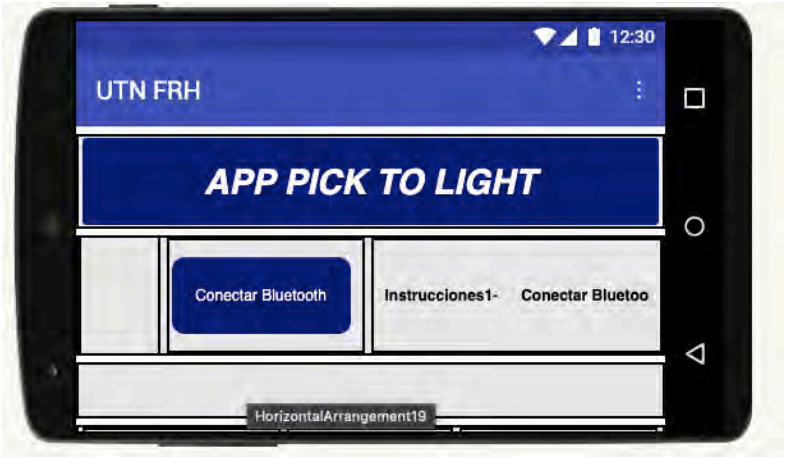



*Figura 6.Interfaz de la aplicación*

- Botón Conectar Bluetooth: vincula el celular con la placa de control.
- Botón Escanear QR: activa cámara para leer códigos.
- Botón Enviar: transmite el código leído a la placa de control.

En relación con los aspectos técnicos de la comunicación, el funcionamiento consiste en que la placa de control recibe datos en formato binario y los almacena en un array. Cada carácter se traduce mediante código ASCII, que es un estándar que asigna un número único a letras, números o símbolos para su interpretación electrónica. Los voltajes lógicos de la placa se definen como 1 lógico aproximadamente 5 V y 0 lógico aproximadamente 0 V (GND). Esta interpretación en formato ASCII garantiza que cualquier carácter transmitido por la aplicación se asocie correctamente a una acción específica en la placa.

Dependiendo del código recibido, la placa activa o desactiva las salidas digitales que controlan los LEDs, guiando al operario hacia la ubicación correcta del producto. Los LEDs son alimentados directamente por las salidas digitales, utilizando resistencias limitadoras de corriente de acuerdo con el estándar de 5 V.

La comunicación serie entre el módulo Bluetooth y la placa opera a una velocidad de 9600 bps, la cual es configurable.

### 3.2 Experimentación

El sistema fue evaluado en una experiencia realizada en el laboratorio de métodos y tiempos de la Universidad Tecnológica Regional - Facultad regional Haedo. Este fue expuesto en la cátedra de Logística Empresarial con el fin de que los alumnos conformen la muestra representativa para el análisis.

#### 3.2.1 Desarrollo

Principalmente se expusieron tres métodos de preparación de pedidos: en primera instancia, tendrá lugar la metodología *Pick to Paper.* Se repetirá la utilización de este modelo dos veces. Luego se introdujo el método *Pick to Voice* y por último el *Pick to Light.*

En el desarrollo del primer método, se conformaron grupos de dos personas, donde cada integrante asumió un rol específico: el primer alumno actuó como Operador de Picking y el segundo como Tomador de Tiempos. Se proporcionó al Operador una hoja de pedido de producción, que sirvió como guía para la preparación del pedido. El Tomador de Tiempos inició el cronometraje al comienzo de la preparación. El Operador, utilizando la Hoja de Ubicaciones de la Estantería, se desplazó a lo largo de la línea del almacén con el objetivo de localizar y recolectar los pedidos indicados en la orden. Una vez que el Operador completó la recolección de los productos, el Tomador de Tiempos registró la duración total de la actividad, anotando esta información junto con los detalles relevantes en la Hoja de Control correspondiente a cada grupo.

UTECNOLUZ S.R.L

**ORDEN DE PRODUCCION**

Fecha de Expedición: 09/11/2024
Departamento/Área: Laboratorio de Métodos y Tiempos

**Se solicita realiza el siguiente artículo:**

Nombre Artículo: LLAVE DE LUZ 2 INTERRUPTORES 15 A 220v
Cantidad de SKUS: 7
Código de Producto: 6432112315002

| | | |
|---|---|---|
| Bastidor estándar | 72150466 | 1 unidad |
| Lamina de cobre | 59646064 | 1 unidad |
| Base de tecla interruptor | 69176269 | 1 unidad |
| Modulo ciego | 78579120 | 1 unidad |
| Tecla interruptor | 18388946 | 1 unidad |
| Tornillo | 48724904 | 1 unidad |
| Tapa Blanca | 98891219 | 1 unidad |

Expedido por: Firma:

*Figura 7.Ejemplo de hoja de pedido*

**Experencia Picking**

| Grupo número: | Integrantes: |
|---|---|

| Pasada | Tiempo total (seg) | Cantidad de SKUs | Tiempo por SKU (seg) |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

*Figura 8.Hoja de Control de cada grupo*

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bastidor estándar | Arandelas x10 | Tenedor | Broche | Lapiz HB | Lapicera roja | Modulo toma exterior | Tornillo |
| Modulo toma interior (gris) | Botones x10 | Cuchillo | Goma de borrar blanca | Lapicera negra | Modulo ciego | Tecla interruptor | Logos |
| Lamina de cobre | Lapicera azul | Base de tecla interruptor | Bornes contacto de | Clasificador de tornillos | Abrazaes x10 | Pinches x10 | Tapa Blanca |

*Figura 9.Hoja de Ubicaciones de la Estantería.*

En el desarrollo del segundo método, se continuó con la división de grupos, manteniendo la misma estructura, pero en esta ocasión el Tomador de Tiempos asumió un rol adicional al emular un sistema de comando por voz para asistir al Operador de Picking. Cada grupo estuvo conformado por dos alumnos: el primer alumno actuó como Operador de Picking y el segundo como Tomador de Tiempos, quien también funcionó como el Sistema de Comandos por Voz. Se proporcionó al Operador una hoja de pedido de producción, que sirvió como guía para la preparación del pedido. El Tomador de Tiempos inició el cronometraje al comienzo de la preparación y comenzó a emitir comandos de voz para guiar al Operador. Este último se desplazó a lo largo de la línea del almacén, buscando las posiciones indicadas según las instrucciones verbales proporcionadas por el Tomador de Tiempos. Al finalizar la recolección de los productos, el Tomador de Tiempos registró la duración total de la actividad, anotando esta información junto con los detalles relevantes en la Hoja de Control correspondiente a cada grupo.

En el desarrollo del tercer método, se mantuvo la estructura de grupos, conformados por dos alumnos, con las siguientes divisiones de trabajo: el primer alumno actuó como Operador de Picking y el segundo como Tomador de Tiempos. En esta ocasión, se proporcionó al Operador una Hoja de Pedido que incluía un código de barras para ser escaneado mediante la aplicación “MétodosyTiempos.apk”.

Una vez escaneado el código, se activó una secuencia de luces que guio al Operador en la recolección de los artículos correspondientes. Las luces se encendieron una a una, de manera secuencial; al pulsar la primera, se iluminó la segunda y así sucesivamente, hasta completar la cantidad de SKU de la orden.

El Tomador de Tiempos cronometró el inicio de la preparación del pedido. El Operador utilizó la misma aplicación para seguir las instrucciones y escanear los códigos de los artículos. A medida que se desplazaba a lo largo de la línea del almacén, buscaba los artículos que se indicaban por las luces encendidas. Por cada artículo recolectado, el Operador debía tocar el botón correspondiente al lado de la luz que se encendía, según la cantidad indicada por el lector. Una vez finalizada la recolección, el Tomador de Tiempos registró la duración total de la actividad, anotando esta información junto con los detalles relevantes en la Hoja de Control de cada grupo.




*Figura 10. Ejemplo de hoja de pedido con código de barras*

### 3.2.2 Resultados

Con una muestra de 27 grupos, se realizaron las siguientes mediciones:

- **Tiempo de Ciclo:** Mide el tiempo total que toma completar un pedido desde el inicio hasta el final.
- **Precisión de Picking**: Mide el porcentaje de pedidos recolectados correctamente frente a los pedidos totales.

*Tabla 1. Valores obtenidos a partir de la experiencia*

| Operador | Pick Manual 1 | | Pick Manual 2 | | Pick to Light 1 | | Pick to Light 2 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Tiempo de Ciclo | Precisión de Picking | Tiempo de Ciclo | Precisión de Picking | Tiempo de Ciclo | Precisión de Picking | Tiempo de Ciclo | Precisión de Picking |
| 1 | 54 | 100% | 45 | 100% | 12 | 100% | 12 | 100% |
| 2 | 36 | 85,70% | 36 | 100% | 15 | 100% | 14 | 100% |
| 3 | 44 | 100% | 50 | 57,10% | 20 | 100% | 16 | 85,70% |
| 4 | 60 | 100% | 58 | 100% | 17 | 100% | 17 | 100% |
| 5 | 32 | 100% | 33 | 100% | 13 | 100% | 12 | 100% |
| 6 | 47 | 85,70% | 42 | 100% | 18 | 100% | 14 | 100% |
| 7 | 37 | 85,70% | 35 | 100% | 14 | 85,70% | 18 | 100% |
| 8 | 63 | 100% | 65 | 71,40% | 22 | 100% | 21 | 100% |
| 9 | 42 | 100% | 47 | 100% | 16 | 100% | 17 | 100% |
| 10 | 30 | 100% | 38 | 100% | 19 | 100% | 22 | 100% |
| 11 | 64 | 85,70% | 60 | 85,70% | 12 | 100% | 12 | 100% |
| 12 | 49 | 100% | 47 | 100% | 14 | 100% | 17 | 100% |
| 13 | 33 | 57,10% | 35 | 85,70% | 13 | 100% | 16 | 100% |
| 14 | 41 | 100% | 39 | 100% | 26 | 100% | 18 | 100% |
| 15 | 58 | 100% | 51 | 85,70% | 18 | 100% | 12 | 100% |
| 16 | 37 | 100% | 40 | 100% | 22 | 100% | 12 | 100% |
| 17 | 49 | 71,40% | 55 | 100% | 14 | 100% | 20 | 100% |
| 18 | 48 | 100% | 42 | 85,70% | 13 | 100% | 15 | 100% |
| 19 | 49 | 85,70% | 49 | 100% | 26 | 100% | 19 | 100% |
| 20 | 66 | 100% | 54 | 100% | 18 | 85,70% | 15 | 100% |
| 21 | 43 | 100% | 40 | 85,70% | 12 | 100% | 15 | 100% |
| 22 | 52 | 100% | 50 | 85,70% | 28 | 100% | 30 | 100% |
| 23 | 46 | 100% | 49 | 100% | 16 | 100% | 17 | 100% |
| 24 | 34 | 85,70% | 30 | 100% | 12 | 100% | 14 | 100% |
| 25 | 40 | 71,40% | 33 | 85,70% | 17 | 100% | 22 | 100% |
| 26 | 45 | 100% | 39 | 100% | 17 | 100% | 19 | 100% |
| 27 | 56 | 100% | 51 | 100% | 30 | 100% | 22 | 100% |
| **Promedio** | **46,48** | **93%** | **44,93** | **94%** | **17,56** | **99%** | **16,96** | **99%** |

## 3. CONCLUSIONES.

Dentro de las conclusiones, las mismas serán encaradas con dos enfoques: el primero, desde un punto de vista logístico, y como el aporte del pick to light ofrece una solución optimizada de bajo costo. Y el segundo, desde una visión educativa para acercar a los estudiantes en un entorno controlado, al desarrollo de las competencias de un Ingeniero Industrial.

El análisis realizado sobre los métodos de picking en el proceso logístico ha demostrado que el sistema "Pick to Light", supera significativamente a los métodos manuales en términos de eficiencia y precisión. Los tiempos de ciclo promedio para los métodos manuales oscilaron entre 44,93 y 46,48 segundos, mientras que los sistemas "Pick to Light" lograron un notable promedio de entre 16,96 y 17,56 segundos. Esta notable reducción en los tiempos de operación no solo optimiza el rendimiento de los operadores, permitiendo procesar un mayor volumen de pedidos por hora, sino que también minimiza la variabilidad en el proceso. Esto se traduce en una mayor consistencia en la gestión de pedidos y mejora la satisfacción del cliente al reducir los errores en la preparación de pedidos.

Además, es fundamental destacar que la implementación de la solución "Pick to Light" impacta positivamente en la huella de carbono de la operación logística. La reducción de tiempos de ciclo conlleva una disminución en el consumo de energía y recursos asociados con las actividades de picking. Al disminuir la necesidad de reprocesos, como la corrección de errores en la selección de productos, se optimiza el uso de recursos, lo que contribuye de manera significativa a la sostenibilidad del sistema.

Mientras que desde el punto de vista educativo, se logró acercar a los alumnos en un entorno controlado (Laboratorio de Métodos y Tiempos), al desarrollo de las competencias de un Ingeniero Industrial. Dichas competencias, ligadas a diseñar, proyectar, modelar y planificar mejoras operacionales relacionados al proceso de preparación de un pedido dentro de un ambiente industrial además de formular y evaluar el nivel de optimización que producen las nuevas tendencias del mercado.

## 4. REFERENCIAS.


Ballou, R. H. (2011). Logística: Administración de la cadena de suministro (ed. en español). Pearson.

Labastida Pallarés, J., & Royo Sánchez, D. J. A. (2010). *Estudio y análisis de picking: Sistemas de picking voz*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial, Universidad de Zaragoza.

SITTHIKARN, M. P., Hakimi, P., & Chuanasa, J. (2015). Pick-to-light systems (No. 188832). Thammasat University. Faculty of Engineering.

Mauleón Torres, M. (Año). *Sistemas de almacenaje y picking*. Díaz de Santos

Patzke, R. L. (2008). *Key attributes used to compare pick-to-light and put-to-light technologies* (Tesis de maestría, University of Wisconsin-Stout).

Anton, Aroza (2017). *Aspectos esenciales de la gestión logística*. Grupo Andreani.



### Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a todo el equipo del Laboratorio de Métodos y Tiempos que permitió llevar a cabo este trabajo y, al Laboratorio de Electrónica por su colaboración en el desarrollo. Así como también en particular al Ingeniero Sergio Cortese, por lo motivación y el compromiso desde el Departamento Industrial de la UTN FRH.

# ANÁLISIS ESTRATÉGICO DE LOS PROVEEDORES LOCALES DE LA INDUSTRIA AERONÁUTICA EN LA ECONOMÍA REGIONAL

Miropolsky, Ariel; Tavella, Demián; Manera, Roxana

*Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba*
*CITED Centro de Investigación y Transferencia en Tecnologías y Estrategias para el Desarrollo*
*amiropolsky@gmail.com; demit1990@gmail.com; roxanamanera@gmail.com*

**RESUMEN**

La provincia de Córdoba, Argentina, se está posicionando como un nodo estratégico en la industria aeronáutica gracias a su sólida red de proveedores aeronáuticos y su apuesta por la sustentabilidad. La cadena de valor en este sector se extiende desde el diseño y la producción de componentes hasta la integración de soluciones avanzadas para la industria aeroespacial, incluyendo la incorporación de combustibles sustentables que reducen el impacto ambiental.

En este trabajo se realizó un análisis estratégico de los proveedores locales, utilizando entre otras, la herramienta PESTEL, lo que revela un ecosistema altamente capacitado y adaptable, donde la sustentabilidad y la innovación son factores clave para la competitividad global. La alianza entre los proveedores aeronáuticos cordobeses representa una asociación estratégica que combina experiencia e innovación, impulsando avances tecnológicos y consolidando soluciones de alto valor para el sector aeroespacial.

Esta colaboración no solo potencia el desarrollo local y la creación de empleos de calidad, sino que también abre nuevas oportunidades para la mejora continua de procesos. De este modo, la cadena de valor aeronáutica en Córdoba se fortalecería, para consolidar un modelo de crecimiento económico sustentable, impactado rápidamente en la economía local y permitiendo generar nuevos empleos para fortalecer el tejido industrial y la especialización técnica de la región

**Palabras Claves:** Industria aeronáutica, cadena de suministro, sostenibilidad

**ABSTRACT**

The province of Córdoba, Argentina, is positioning itself as a strategic hub in the aeronautical industry thanks to its strong network of aeronautical suppliers and its commitment to sustainability. The value chain in this sector extends from the design and production of components to the integration of advanced solutions for the aerospace industry, including the incorporation of sustainable fuels that reduce environmental impact.

This study conducted a strategic analysis of local suppliers, using the PESTEL tool, among others. This revealed a highly capable and adaptable ecosystem, where sustainability and innovation are key factors for global competitiveness. The alliance between Córdoba's aeronautical suppliers represents a strategic partnership that combines experience and innovation, driving technological advances and consolidating high-value solutions for the aerospace sector.

This collaboration not only enhances local development and the creation of quality jobs, but also opens up new opportunities for continuous process improvement. In this way, the aeronautical value chain in Córdoba would be strengthened, consolidating a model of sustainable economic growth, rapidly impacting the local economy and enabling the creation of new jobs to strengthen the region's industrial fabric and technical specialization.

**Keywords:** Aeronautical industry, supply chain, sustainability

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria aeronáutica en Argentina tiene una historia que se remonta a más de un siglo, iniciando en 1907 con vuelos en globos aerostáticos y consolidándose en el sector militar con la creación de la Fábrica Argentina de Aviones “Brig. San Martín” (FAdeA) en la ciudad de Córdoba en 1927. A lo largo de los años, este sector ha enfrentado diversos desafíos derivados de factores históricos, económicos y políticos que han afectado su capacidad de producción y desarrollo tecnológico. Sin embargo, en los últimos años, se han implementado políticas y leyes, como la Ley 27.565 (2020), creando el Fondo Nacional de la Defensa (FONDEF,2020), que busca fortalecer la industria aeronáutica nacional mediante la asignación de fondos específicos y la colaboración con proveedores locales, con el objetivo de sustituir importaciones y potenciar la innovación en el sector. El ecosistema de la industria de defensa es sumamente amplio, abarcando desde empresas y prestadoras de servicios hasta institutos de investigación, ciencia y tecnología, lo que resalta la importancia del rol que cumple FONDEF en la reactivación de una industria clave como la aeronáutica, en la cual la principal empresa impulsora es FAdeA (Miropolsky et al, 2024). Ante este escenario, el desafío radica en desarrollar un modelo de selección de proveedores que permita aprovechar al máximo los impulsos generados por FONDEF, fortaleciendo así toda la cadena de valor del sector.

En este contexto, Córdoba ha logrado posicionarse como un nodo estratégico en la industria aeronáutica y cuenta con varias empresas y proveedores que trabajan en ese sector. La cadena de valor en esta región abarca desde el diseño y la producción de componentes hasta la integración de soluciones avanzadas. La colaboración entre proveedores cordobeses ha generado un ecosistema, donde la innovación y la sustentabilidad son factores clave y deseables para mantener la competitividad global. Sin embargo, a pesar de contar con un fondo específico para el desarrollo de la industria local, los altibajos en el sector han provocado que se pierda el conocimiento sobre la materia y que disminuya el listado de empresas capaces de fabricar productos aeronáuticos. Por ello, resulta fundamental desarrollar y optimizar métodos eficientes de selección de proveedores de piezas aeronáuticas, que permitan fortalecer y expandir esta cadena de valor en el futuro, asegurando así la continuidad y el crecimiento de la industria en la región.

Para comprender y fortalecer este ecosistema, es fundamental realizar un análisis estratégico que considere tanto los factores internos como externos que afectan a los actores del sector. La metodología PESTEL (Político, Económico, Social, Tecnológico, Ecológico/Ambiental y Legal) se presenta como una herramienta eficaz para evaluar el entorno externo en el que operan los proveedores aeronáuticos. Este análisis permite identificar oportunidades y amenazas, así como comprender cómo los factores macro ambientales influyen en la capacidad de innovación, sostenibilidad y crecimiento de la cadena de valor. (Yüksel, 2012).

La selección de proveedores es uno de los aspectos más críticos en la gestión de las cadenas de suministro, ya que un proceso inadecuado puede generar consecuencias tanto económicas como operativas (Krause, Handfield, & Scannell, 1998).

Los criterios para la selección deben considerar aspectos económicos y comerciales, pero también es fundamental incluir factores técnicos, de calidad del producto, capacidad de respuesta, así como aspectos financieros y legales (Cousins, Lamming, Lawson, & Squire, 2008). Además, en el contexto actual, la incorporación de criterios de sustentabilidad resulta esencial. Estos incluyen dimensiones ambientales y sociales, que aseguran que la política de sostenibilidad de la organización se extienda a sus socios comerciales, promoviendo prácticas responsables en toda la cadena de suministro (Seuring & Müller, 2008). Por ello, fortalecer el aprovisionamiento sustentable requiere del compromiso de la alta dirección. La identificación de aspectos económicos, sociales y ambientales, y la evaluación y selección de proveedores deben estar en consonancia con estos principios. La capacitación y concientización del personal involucrado en la gestión del suministro, junto con la implementación de procedimientos de medición y análisis, son fundamentales para garantizar una gestión eficiente y responsable (Carter & Rogers, 2008). En este sentido, la herramienta PESTEL, facilita la identificación de variables clave que impactan en el sector aeronáutico, permitiendo a las empresas adaptarse proactivamente a cambios en su entorno. Por ejemplo, en el contexto argentino, las políticas gubernamentales y las regulaciones legales son determinantes para la operación de proveedores aeronáuticos, dado que el sector está altamente regulado por normativas nacionales e internacionales (García & Fernández, 2018). Asimismo, aspectos económicos como la inflación o las fluctuaciones cambiarias pueden afectar la inversión y la competitividad del sector (Banco Mundial, 2022).

En cuanto a los factores sociales y tecnológicos, la demanda por soluciones sustentables e innovadoras impulsa a las empresas a adoptar nuevas tecnologías y prácticas responsables (Porter & Kramer, 2011).

En esta línea, el análisis PESTEL incluye dentro de sus dimensiones factores ambientales relevantes para promover una industria más sostenible. La creciente preocupación por el impacto ambiental del transporte aéreo ha llevado a una mayor regulación en emisiones y gestión de residuos (ICAO, 2020). En este sentido, los proveedores deben alinearse con tendencias globales hacia compras responsables y sustentables para mantener su competitividad.

Este trabajo propone un análisis estratégico de los proveedores locales mediante la herramienta PESTEL, con el propósito de examinar tanto su entorno como su potencial de desarrollo. Asimismo, se incorporan criterios de selección que contemplan dimensiones económicas, sociales, ambientales y tecnológicas, en concordancia con los lineamientos actuales de compras responsables y sostenibles que aportarán importantes indicadores que se tendrán en cuenta en la selección del proveedor. La articulación de estos enfoques busca fortalecer la cadena de valor aeronáutica en Córdoba, favoreciendo un crecimiento económico sustentable, la generación de empleo de calidad y la consolidación de soluciones innovadoras orientadas a la industria aeroespacial.

## 2. METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se decidió utilizar la metodología PESTEL, complementada con entrevistas semi estructuradas a informantes clave para validad los resultados obtenidos; tomando como caso testigo uno de los proyectos de FAdeA, ya que potenciados con la implementación del FONDEF, tiene la posibilidad de contratar proveedores locales que suministren materiales aeronáuticos que históricamente fueron adquiridos en el exterior.

En cuanto a las entrevistas a informantes claves de la organización, se revelaron aspectos conducentes a comprender y poder definir aquellos factores que la organización considera de mayor relevancia a la hora de evaluar a sus proveedores de productos aeronáuticos, entendiéndose por estos, aquellos productos que impactan directamente en la fabricación de un avión o productos vinculados.

Los informantes claves fueron seleccionados en base a la estructura orgánica de la organización y de las necesidades del estudio, buscando entrevistar a aquellos miembros de la empresa impactados por este trabajo, es decir a aquellos cuya opinión tenga peso e influencia en el proceso de selección de proveedores.

En total se realizaron 8 entrevistas, a diferentes integrantes de la organización que forman parte de 5 áreas o gerencias de FAdeA a saber: Subgerencia General, Gerencia de Supply Chain, Gerencia de Ingeniería, Gerencia de Programas y Desarrollo de Negocios y Gerencia de Administración y Finanzas.

El motivo de elección de estas áreas es que éstas son las cinco afectadas directa e indirectamente tanto en el proceso de selección como en el posterior seguimiento de los proveedores, de las cuales en general se establecen, los principales criterios a tener en cuenta en cualquier proceso estándar.

Cabe destacar que no se entrevistó a la Gerencia de Calidad, pues para que un proveedor pueda ser considerado para un proceso de selección deben cumplir una serie de estándares definidos en la norma interna de calidad NPF/GCAL/008 REV C del 03/10/2022. En caso de que no cumplan estos requisitos no pueden comenzar a trabajar con la organización, ni ser considerado como válido.

Con esta información se buscó acceso primario a la realidad en forma directa y generación de mediciones más adecuadas al tema de estudio, obteniéndose información rigurosa y exacta basada en las preguntas realizadas.

Para este caso particular, las entrevistas se realizaron en forma presencial en las instalaciones de FAdeA en los horarios y días acordados con cada uno de los entrevistados, previa anticipación de los temas a tratar y metodología de la actividad, ya que como indica, Rezzónico (2012), cuanto mayor es el conocimiento de las modalidades y pautas culturales del grupo, agregado social, o comunidad de cualquier tipo que se desea estudiar, menores son los riesgos de desencuentro entre entrevistadores e informantes.

Las entrevistas tuvieron un carácter semi-estructurado, con las mismas preguntas para todos los actores, algunas cerradas y varias preguntas abiertas con el objetivo de que los entrevistados explayen su punto de vista y experiencias que podrían ser enriquecedoras para este estudio.

Las preguntas se orientaron a identificar los criterios más relevantes al momento de seleccionar un proveedor local. Para ello, se solicitó a los participantes que nombraran cuál de los aspectos utilizados en la metodología consideraban de mayor peso, permitiéndoles elegir entre aspectos comerciales, de salud financiera, técnicos, de sistemas de calidad, ambientales y sociales, con la posibilidad de proponer cualquier aspecto adicional no contemplado inicialmente. También, se les pidió establecer un orden de preferencia mediante una valoración numérica para reflejar la importancia relativa de cada aspecto. Algunos de estos aspectos fueron desglosados en sub aspectos específicos en preguntas posteriores. Por ejemplo, el aspecto técnico incluía elementos como propuesta técnica, experiencia y conocimiento del proveedor (know-how), cronograma, capacidad de producción y proceso de fabricación, certificaciones y calificaciones, permitiéndoles sugerir algún otro posible elemento. De manera similar, el aspecto comercial abarcaba subelementos como precio, forma de pago y relación comercial, con la opción de incorporar otros sub aspectos no previstos inicialmente. También en estos casos, se les propuso asignar una valoración numérica para reflejar claramente qué tan importante consideran cada uno en su proceso de selección.

En cuanto a los aspectos sociales, que se destacan no solo el compromiso demostrado en las consultas y la relación previa con la empresa, sino que hacen referencia principalmente a que los proveedores cumplan con sus trabajadores requisitos básicos laborales y ofrezcan evidencia de buenas condiciones de trabajo, promoviendo un entorno laboral justo y ético, y a los aspectos ambientales, que hacen referencia al impacto ambiental de los productos o servicios ofrecidos, como las prácticas de gestión medioambiental del proveedor y la implementación de sistemas que aseguren una operación sostenible, se les consultó en ambos casos, si deberían ser bloqueantes ante un proceso de selección de proveedores, resaltando la importancia de integrar principios de sostenibilidad en las decisiones comerciales para promover un desarrollo más responsable y respetuoso con el entorno social y ambiental.

Es importante señalar que en las entrevistas no se incluyeron preguntas relacionadas con aspectos políticos y legales, dado que estos corresponden al entorno externo de los proveedores y aplican de igual manera a todos ellos. Sin embargo, el grado de cumplimiento de las condiciones regulatorias y acuerdos legales establecidos por FAdeA o por el estado puede variar, lo cual resulta un factor determinante en la selección de proveedores.

Habiendo realizado el estudio de campo correspondiente, se procedió a la definición del caso testigo en donde se aplicaría la metodología PESTEL. Para tal selección se consideraron solo aquellos casos de desarrollo de productos, desde su inicio, en donde se evalúan varios oferentes con diferentes perspectivas, capacidades y atributos.

Por último, se debe destacar que la metodología PESTEL permite a las empresas del sector, como FAdeA, tener una visión integral del entorno en el que operan. Al analizar factores políticos y legales, se puede asegurar que los proveedores cumplen con las normativas internacionales y nacionales, evitando sanciones o retrasos. La evaluación de aspectos económicos ayuda a identificar proveedores con estabilidad financiera, crucial en una industria donde la calidad y la puntualidad son vitales. Por otro lado, considerar factores sociales y tecnológicos permite detectar proveedores innovadores y responsables socialmente, alineados con las tendencias sostenibles y de innovación que caracterizan a la industria aeronáutica. Además, analizar aspectos ambientales ayuda a seleccionar socios que cumplen con estándares ecológicos, promoviendo una producción más sostenible.

En resumen, es una herramienta útil para evaluar el entorno externo de los proveedores (factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales). Sin embargo, por sí solo no es suficiente para la selección de proveedores en la industria aeronáutica, porque no discrimina entre proveedores, ya que el entorno macro es compartido. Lo que marca la diferencia entre ellos es cómo cada proveedor responde a ese entorno en acciones, capacidad adaptativa al entorno o recursos, en cada una de las dimensiones estudiadas por PESTEL, y de este análisis surgen indicadores cuya comparativa ofrece a la empresa contratista, en este caso FAdeA elementos que ayudan a reducir riesgos, fomentar alianzas estratégicas sólidas y asegurar que la cadena de suministro sea resiliente, innovadora y alineada con las exigencias del sector.

## 3. DESARROLLO

### 3.1 Resultados de la encuesta

En relación con las preguntas de la entrevista, podemos resumir que el aspecto técnico fue el más valorado por todos los entrevistados tanto en la elección de entre todos los presentados, como en

puntuación. Otros criterios que también resultaron relevantes, fueron el comercial y financiero, el sistema de gestión de calidad y luego los ambientales y sociales. Cabe señalar que ninguno de los entrevistados sugirió algún criterio por fuera de los presentados.

Sin embargo, se debe destacar que el 100% de los entrevistados estuvo de acuerdo que tanto el criterio social como ambiental deberían ser bloqueantes, uno para asegurar la formalización del trabajo, por parte de los proveedores de la empresa, y el otro para cumplir con los requisitos ambientales según las leyes que lo rigen. En este punto cabe aclarar en cuanto al factor social, que FAdeA es responsable de toda su cadena logística y debe garantizar que sus proveedores y sus subproveedores cumplan con altos estándares sociales, evitando prácticas como el trabajo infantil y condiciones laborales insalubres para proteger su imagen. Además, el Sub Gerente General señaló que contratar proveedores irregulares implica responsabilidad compartida ante posibles ilícitos, por lo que es fundamental verificar el cumplimiento de normas ambientales y laborales. El Gerente de Finanzas resaltó que, aunque las empresas serias exigen el cumplimiento legal de sus proveedores, muchas no pueden auditarlo, por lo que este requisito es eliminatorio para evaluar la capacidad de proveer servicios de calidad a precios razonables. Por último, la Gerente de Supply Chain destacó la dificultad práctica de verificar las condiciones laborales, ya que a menudo se requiere información confidencial que los proveedores no desean compartir, situación que se complica aún más por la escasez de proveedores aeronáuticos.

Pasando a los criterios comerciales, se destaca, que tanto el precio, como la forma de pago y la relación comercial, fueron elegidos por todos los participantes, por lo que son claramente los más importantes, sin embargo, dada la complejidad de la industria hay que tomar propuestas válidamente comparables. El precio solo puede aplicarse como criterio cuando tenemos piezas que son sustituibles o la diferencia de calidad es tolerable. Por otro lado, la salud financiera es un aspecto clave a la hora de embarcarse en un desarrollo, ya que proveedores sin salud financiera son altamente riesgosos para relaciones a largo plazo, y para la provisión de componentes que deberán soportar aeronaves en operación por entre 15 a 25 años.

De todas formas, si bien se debe controlar que el proveedor no esté quebrado económicamente, existen mecanismos de ayuda vía gobierno para dar solidez a una contratación. También se dispone del apoyo cuando se construye una relación bilateral entre la empresa contratante y el proveedor en la cual se da soporte económico y técnico en el acompañamiento que da mayor seguridad en el proyecto.

Por último, en cuanto al aspecto técnico claramente la propuesta técnica se valora como el criterio más importante ya que fue elegido por todos los participantes, seguida por el cronograma, la capacidad de producción y procesos de fabricación.

En resumen, según las opiniones recabadas el aspecto más importante resulta ser el técnico, seguido por el comercial y financiero. La razón principal, se sustenta por la naturaleza del rubro, pues por el nivel de especificidad en los proyectos y el impacto final en la seguridad de vuelo, este aspecto resulta crucial. Respecto al criterio comercial, dado que la competencia se realiza a nivel internacional, la competitividad alcanzada por un buen precio de los componentes, piezas o productos, vuelve viable o inviable cualquier tipo de proyecto. Por último, en lo referido a lo financiero, la misma resulta importante por la gran cantidad de erogaciones que tienen que hacer los proveedores al principio del proyecto y luego en la relación a largo plazo para soportar la provisión para una aeronave en su vida útil.

### 3.2 Definición del caso de estudio

Como se ha comentado, el objeto de este trabajo es aplicar la metodología PESTEL en un caso de selección de proveedores aeronáuticos del ámbito nacional. Esto plantea como primer interrogante: qué se considera proveedor aeronáutico y qué no aeronáutico.

Dado que el trabajo se realiza tomando como base la empresa FAdeA SA, una buena forma de establecer esta diferencia es tomar lo definido en la normativa interna de la organización.

La IPE 05.004 (Instrucciones de práctica estándar) de FAdeA SA cuya revisión fue el 14/10/2022, tiene entre sus objetivos establecer un procedimiento para asegurar que todos los proveedores actuales y potenciales sean clasificados, calificados y evaluados según la capacidad de los mismos para proveer productos y servicios que satisfagan los requerimientos de calidad de FAdeA. Esta define que existen 6 (seis) categorías de proveedores posibles:

- Categoría I: En general proveedores del área de finanzas como bancos, instituciones financieras, proveedoras de seguros entre otros.

- Categoría II: Proveedor de Productos o Servicios generales que no tienen impacto en los procesos principales de la empresa. Por ejemplo, librerías, ferreterías, tercerización de mano de obra, entre otros.
- Categoría III: Proveedor fabricante de producto aeronáutico
- Categoría IV: Proveedor de Servicio aeronáutico, incluyendo el mantenimiento contratado.
- Categoría V: Proveedor Distribuidor de producto aeronáutico.
- Categoría VI: Proveedor de productos o servicios que tienen impacto indirecto en el sistema de gestión de calidad de la empresa o sus procesos de apoyo.

De estas 6 (seis) categorías, la norma IPE 005, define que las categorías I y II, no son considerados aeronáuticos, mientras que las categorías III, IV, V y VI si son considerados como servicios de tipos aeronáuticos, pues afectan de forma indirecta o directa la seguridad en vuelo.

Basado en lo anterior, se seleccionará un caso de proveedores “categoría III: proveedores fabricante de producto aeronáutico”, pues representan fabricantes propiamente dichos de piezas o productos que van directamente en un avión.

Según la norma de proceso NPF/GCAL/008 REV C de FAdeA SA del 03/10/2022, son fabricantes de productos aquellos que entregan números de partes propios (P/N) (fabricantes originales), P/N propiedad de FAdeA con procesos de certificación aeronáutica y/o certificación de fabricación.

En este caso, el criterio de aceptación se basa en los certificados de calidad del proveedor fabricante, así como las respuestas en los cuestionarios pertinentes

Esta tal vez, sea la categoría de proveedores más importante que intenta fomentar el programa de FONDEF (Fondo Nacional de la Defensa) (Ministerio de Defensa, 2020), basados en las diferentes fabricas nacionales que tienen capacidades utilizadas actualmente en otro tipo de industria como por ejemplo la automotriz.

Por otra parte, este grupo de proveedores fue el más afectado por los vaivenes de la industria aérea Argentina, quedando reducido a un número pequeño, que se nuclean en la Cámara Argentina Aeronáutica y Espacial (CArAE). Esta situación, le da más importancia a la hora de la elección de un caso de esta categoría para realizar la investigación en cuestión.

### 3.3 Metodología PESTEL: Descripción del caso testigo: Bancada de motor

El caso testigo utilizado para aplicar la metodología es la compra de la bancada de motor para el avión IA100B. Se eligió este caso por ser un nuevo desarrollo de la fábrica, correspondiente a proveedores de categoría III (*Categoría III: Proveedores fabricante de producto aeronáutico*).

La bancada es el órgano que constituye la parte inferior del motor de cualquier tipo, sirve de soporte para las piezas en movimiento y de muro de contención para el aceite lubricante. Se define en función del tipo de motor a utilizar y la configuración que el diseñador adopta en cada caso. De manera particular una bancada debe ser diseñada en función de los requerimientos definidos para su uso en cada aeronave. Estos requerimientos estructurales y conceptuales varían según la normativa aplicada (Pergolini, 2015). En el caso de FAdeA, por una cuestión de confidencialidad no se puede detallar toda la información técnica del material, pues corresponde a un avión que todavía está en fase de desarrollo, pero se detallan algunos requisitos básicos que debía cumplir la pieza:

- Tecnología: Soldadura por TIG, debe ser realizada por un soldador certificado
- Material: Tubos de Acero AISI 4130N
- Dimensiones: Ø y espesor (Según detalle del plano)

### 3.4 Descripción de los proveedores a evaluar

Para el caso de la compra de la bancada de motor en total se invitaron a 6 proveedores diferentes todos locales, de los cuales 3 son de la provincia de Buenos Aires, dos de la provincia de Córdoba y uno de Santa Fé. Debido a que la empresa FAdeA tiene firmado un acuerdo de confidencialidad con cada uno de los proveedores que participan en sus proyectos, es que no puede indicarse en forma explícita el nombre de las empresas analizados para cada caso, ya que quedarían expuestos aspectos sensibles

como capacidad instalada, situación financiera, entre otros. De todas formas, se hará una pequeña descripción de los participantes.

El listado de proveedores queda definido entonces con los siguientes nombres:

1. Proveedor H
2. Proveedor C
3. Proveedor PG
4. Proveedor Con
5. Proveedor DA
6. Proveedor AWI

En términos generales, se puede decir que, todos los oferentes alcanzaron una calificación mínima desde lo técnico, aunque hay tres que tenían ventajas pues tenían experiencia en desarrollos con la empresa FAdeA para otros proyectos como fue el IA 63 Pampa III.

Desde lo financiero, solo tres proveedores pueden considerarse como realmente solventes.

Desde lo económico, salvo para un proveedor, el resto alcanzó el target del proyecto, habiendo uno que ofreció un precio un 10% por debajo.

A continuación, se presenta una tabla resumen de las valoraciones aportadas por el trabajo de campo para cada uno de los aspectos considerados.

*Tabla 1. Indicadores de desempeño del análisis PESTEL por proveedor*

| Proveedor | Político-Legal | Económico | Social | Tecnológico | Ambiental |
|---|---|---|---|---|---|
| H | Cumplimiento de regulaciones; acuerdos de confidencialidad | Atiende el target del precio en menos de un 7.5% de lo establecido. Forma de pago anticipado 30% resto diferido a un mes o más. Buena relación comercial con la empresa y muy buena solvencia financiera | Responde en un tiempo aceptable de las consultas realizadas<br>buena reputación laboral | La propuesta cumple todos los puntos referidos en la especificación técnica. Atiende al cronograma con un margen de 15 a 30 días. Además, dispone de tecnología de punta y capacidad instalada para la fabricación del producto en los tiempos solicitados. No ha fabricado antes el producto, pero ha tenido experiencia con FAdeA en la entrega de otros productos | Manejo responsable de residuos |
| C | Cumplimiento de regulaciones; acuerdos de confidencialidad | No atiende el target por más de un 5 %. Mediana capacidad de negociación de precios. Forma de pago: 70 % anticipado y el resto en diferido no menor a 30 dias. Buena relación comercial con FAdeA y excelente solvencia financiera | Responde en un tiempo aceptable de las consultas realizadas.<br>buena reputación laboral<br>Buena relación con FAdeA, | La propuesta cumple todos los puntos referidos en la especificación técnica y realiza propuestas innovadoras. Sin embargo, no atiende al cronograma por un plazo menor a 15 días. dispone de tecnología de punta y capacidad instalada para la fabricación del producto en los tiempos solicitados. No ha fabricado antes el producto, pero ha tenido experiencia con FAdeA en la entrega de otros productos | Procesos documentados de tratamiento de residuos y certificaciones iso 14001 al día. |

| Proveedor | Político-Legal | Económico | Social | Tecnológico | Ambiental |
|---|---|---|---|---|---|
| PG | Cumple lo necesario de las regulaciones impuestas por el estado. Cumplen los acuerdos de confidencialidad | Atiende el target en menos de un 1% de lo establecido. Forma de pago: 70 % anticipado y el resto en diferido no menor a 30 dias. Poca relación comercial con FAdeA<br>Presupuesto ajustado | Responde en corto tiempo a las consultas realizadas.<br>Cumplimiento de normas laborales | La propuesta cumple todos los puntos referidos en la especificación técnica y realiza propuestas innovadoras. Sin embargo, no atiende el cronograma por un plazo de 45 dias. Dispone de tecnología de punta para la fabricación del producto, pero su capacidad de producción está parcialmente ocupada por otros proyectos, por lo que tendría que esperar un tiempo para poder atender a FAdeA, con necesidad de agregar un turno más. No ha fabricado antes el producto, puede hacerlo, pero no tiene experiencia anterior con FAdeA. | Cumplen un 10% de lo solicitado por las normas ambientales. |
| Con | Cumple lo necesario de las regulaciones impuestas por el estado. Cumplen los acuerdos de confidencialidad | Atiende el target hasta en menos de un 2.5% de lo establecido. Forma de pago: 50% anticipado, resto en diferido no menor a 30 dias. Poca relación comercial con FAdeA<br>Aceptable salud financiera | Responde en un tiempo aceptable de las consultas realizadas.<br>Cumplimiento de normas laborales | La propuesta cumple todos los puntos referidos en la especificación técnica y realiza propuestas innovadoras. Sin embargo, no atiende el cronograma por un plazo de 45 días. No dispone de tecnología ni maquinarias para la fabricación del producto, pero tiene la posibilidad de adquirirlo en el corto plazo sin asistencia de FAdeA y con mínima inversión. No ha fabricado antes el producto, puede hacerlo, pero no tiene experiencia anterior con FAdeA. | No están certificados con normas ambientales, pero cumplen con un 70% de los solicitado en la norma.<br>Busca optimizar uso de materiales |
| DA | Cumple lo necesario de las regulaciones impuestas por el estado. Cumplen los acuerdos de confidencialidad | Atiende el target en más de un 7,5% de lo establecido. Forma de pago: 70 % anticipado y el resto en diferido no menor a 30 dias. Poca relación comercial con FAdeA. Presupuesto ajustado | Responde al momento las consultas realizadas<br>Historia de responsabilidad social local | La propuesta cumple entre un 60% y un 80% todos los puntos referidos en la especificación técnica del producto. No atiende el cronograma por un plazo menor a 15 días. Dispone de tecnología de punta para la fabricación del producto, pero su capacidad de producción está parcialmente ocupada por otros proyectos, por lo que tendría que esperar un tiempo para poder atender a FAdeA, con necesidad de agregar un turno más. No ha fabricado antes el producto, puede hacerlo, pero no tiene experiencia anterior con FAdeA. | Cumplen un 10% de lo solicitado por las normas ambientales. |

| Proveedor | Político-Legal | Económico | Social | Tecnológico | Ambiental |
|---|---|---|---|---|---|
| AWI | Cumplimiento de regulaciones; acuerdos de confidencialidad | Atiende el target en menos de un 1% de lo establecido. Forma de pago: 100% anticipado. Poca relación comercial con FAdeA. Pero tiene excelente salud financiera | Responde al momento las consultas realizadas<br>Menor integración social, pero cumple lo requerido | La propuesta cumple todos los puntos referidos en la especificación técnica y realiza propuestas innovadoras. Sin embargo, no atiende el cronograma por un plazo de 45 dias. dispone de tecnología de punta y capacidad instalada para la fabricación del producto en los tiempos solicitados. Tiene experiencia en la fabricación del producto para otras empresas | Procesos documentados de tratamiento de residuos |

### 3.5 Aplicación del método PESTEL

Aspecto Político / Legal: En el plano político y legal, la industria aeronáutica argentina se desenvuelve en un entorno altamente regulado que exige a FAdeA cumplir con normativas locales e internacionales, así como operar bajo estrictos acuerdos de confidencialidad. El desarrollo de proyectos como el IA100B se enmarca en políticas estatales de apoyo al sector aeronáutico y tecnológico nacional, lo que favorece la participación de proveedores locales. A su vez, la continuidad de políticas industriales y de defensa resulta clave para garantizar la sostenibilidad de largo plazo. En este contexto, los proveedores deben ajustarse al cumplimiento riguroso de normativas y certificaciones aeronáuticas, además de aceptar contratos con cláusulas que aseguren protección de datos, trazabilidad y calidad, todo ello bajo estándares legales que limitan la difusión de información técnica y comercial.

Aspecto Económico: La alta volatilidad macroeconómica en Argentina afecta los costos de insumos como el acero AISI 4130N y la estabilidad financiera de los proveedores. La solvencia financiera de los proveedores debe asegurar la entrega y calidad en los tiempos requeridos. La competitividad en precio debe cumplir con el target financiero del proyecto.

Aspecto Social: En cuanto al impacto en el empleo local, favorecer a proveedores de la provincia impulsa el desarrollo regional y mercados de trabajo especializados. En capacitación, uno de los requisitos centrales es que el proceso de soldadura TIG sea realizado por soldadores certificados, garantizando calidad y seguridad. La experiencia previa con FAdeA otorga confianza y reduce riesgos de integración.

Aspecto Tecnológico: La manufactura de la bancada requiere tecnología de soldadura avanzada (TIG) y experiencia probada en el trabajo con acero aeronáutico. En innovación, la capacidad de adaptar el diseño a las normas y necesidades específicas de cada aeronave es fundamental, favoreciendo a proveedores con historial en el sector. La actualización constante en normativas de calidad y producción aeronáutica es indispensable para la homologación de piezas.

Aspecto Ecológico (Ambiental): Se exige cumplimiento de prácticas responsables de manejo de residuos y eficiencia en el uso de recursos. Los proveedores que aplican procesos documentados y políticas internas de reducción de desechos muestran ventajas ante posibles requerimientos ambientales presentes o futuros.

A continuación, se detalla la evaluación de los seis proveedores considerados, bajo estricta confidencialidad y basados en los indicadores de desempeño aportados por la tabla 1 precedente, para el caso FAdeA y la compra de la bancada de motor del IA100B.

### 3.6 Análisis de indicadores

Aspecto Político / Legal: En el sector aeronáutico, el componente legal es clave: los proveedores deben cumplir normativas nacionales e internacionales, firmar acuerdos de confidencialidad con FAdeA y proteger la información técnica. Además, la estabilidad política y las regulaciones específicas aseguran

un marco jurídico confiable para las adquisiciones. Para ninguno de los proveedores existen antecedentes de conflictos laborales, sanciones o incumplimientos legales en la relación con la fábrica. En este contexto, tanto el Proveedor H como el C y el AWI se destacan por su estricto cumplimiento de regulaciones y por mantener toda su documentación al día, lo que refuerza la solidez y confiabilidad del proceso.

Aspecto Económico: Los proveedores analizados muestran diferentes niveles de solvencia financiera y capacidades de negociación, lo que influye en su atractivo y en las condiciones que ofrecen. Por ejemplo, algunos, como el proveedor PG, presentan precios por debajo del target en menos del 1%, lo cual resulta muy atractivo desde el punto de vista económico; sin embargo, presenta condiciones de pago poco flexibles, tienen poca relación comercial previa con la empresa, lo que puede representar ciertos riesgos, además su presupuesto es ajustado. Por otro lado, el proveedor H se destaca porque ofrece un precio que está aproximadamente un 7.5% por debajo del target, cuenta con condiciones de pago flexibles, como un 30% anticipado y el resto diferido, y una excelente solvencia financiera, lo que lo convierte en una opción muy sólida. El proveedor C, en cambio, excede el target en más de un 5%, con condiciones de pago del 70% anticipado y una solvencia muy buena, mientras que el proveedor Con, que está cerca del target con un -2.5%, ofrece condiciones intermedias con un 50% anticipado y una salud financiera aceptable. El proveedor DA supera el target en un +7.5%, con condiciones comunes y un presupuesto ajustado, y finalmente, el proveedor AWI presenta un precio muy competitivo, con un -1%, cuenta con una excelente salud financiera, pero exige un pago del 100% anticipado.

Aspecto Social: La reputación laboral y la relación con FAdeA son aspectos importantes por considerar, ya que una buena relación social puede facilitar la colaboración y reducir posibles riesgos de conflictos. En general, todos los proveedores cumplen con estos aspectos, pero destacan especialmente el proveedor H y C, quienes tienen mejores relaciones históricas con FAdeA y han respondido de manera adecuada a consultas. Además, la capacidad de responder en tiempos aceptables y la responsabilidad social de los proveedores también influyen en la percepción de confiabilidad y compromiso. Por ejemplo, los proveedores PG, DA y AWI son reconocidos por contestar rápidamente a requerimientos urgentes, lo que suma puntos en su evaluación. Por último, la integración social y el historial con FAdeA marcan diferencias importantes, ya que H, C y en menor medida PG, cuentan con experiencia previa con la fábrica, lo que puede facilitar aún más la colaboración y el cumplimiento de los objetivos comunes.

Aspecto Tecnológico: Todos los proveedores cumplen con las especificaciones técnicas básicas, como TIG, materiales y dimensiones, lo cual es un buen punto de partida. Algunos, como el proveedor H y AWI, cuentan con tecnología de punta y experiencia previa con FAdeA, lo que puede ayudar a reducir riesgos técnicos y posibles retrasos en el cronograma. Además, tanto C como AWI ofrecen propuestas innovadoras y tienen una capacidad instalada suficiente para afrontar los proyectos; en particular, AWI tiene experiencia fabricando la bancada para otros clientes, lo que refuerza su confiabilidad. Por otro lado, proveedores como PG, Con y DA también cumplen con los requisitos técnicos, pero podrían presentar demoras en el cronograma, ya que pueden requerir unos 45 días adicionales, y en algunos casos su capacidad instalada es limitada o necesita ser ampliada para cumplir con los plazos y volúmenes requeridos.

Aspecto Ecológico/Ambiental: La gestión responsable de residuos y las certificaciones ambientales, como la ISO 14001, son aspectos clave para cumplir con las normativas vigentes y reducir el impacto ambiental de las operaciones. Algunos proveedores destacan por cumplir con un alto porcentaje de estas normas, lo que los convierte en opciones preferentes para proyectos con un enfoque sustentable. En particular, C y AWI muestran un mejor desempeño ambiental, ya que cuentan con procesos documentados, una gestión adecuada de residuos y certificaciones ISO 14001. Por otro lado, H y Con demuestran un manejo responsable y una buena intención ambiental; sin embargo, Con aún no está completamente certificado, cumpliendo aproximadamente el 70% de las normativas. En contraste, PG y DA presentan un bajo cumplimiento ambiental, lo cual puede ser un factor crítico negativo a considerar en la selección de proveedores.

### 3.7 Conclusión del análisis PESTEL

Del análisis PESTEL y de la comparativa de los indicadores se evidencia claras fortalezas de proveedores como H, C y AWI, quienes cumplen ampliamente los requisitos técnicos y legales, tienen suficiente solvencia económica y una clara apuesta por la calidad ambiental y reputación social, sin embargo, en una comparación directa, el proveedor AWI destaca por su experiencia previa en la

fabricación y su sólida solvencia, aunque presenta el inconveniente de requerir un pago del 100% por adelantado, lo que podría generar riesgos financieros para FAdeA, además de tener menor integración social. Por otro lado, C enfrenta desafíos relacionados con cronogramas y experiencia previa, además de tener un precio superior al objetivo establecido; mientras tanto, DA/PC/Con muestran mayores debilidades en aspectos como demoras, cumplimiento ambiental y experiencia. En contraste, el proveedor H ofrece un equilibrio favorable entre cumplimiento normativo, precio razonable, estabilidad financiera, historial con la empresa, tecnología disponible y compromiso ambiental, posicionándose como la opción más recomendable para FAdeA en este proceso.

Las razones principales fueron:

- Político/Legal: Cumple todas las regulaciones y acuerdos de confidencialidad requeridos por FAdeA, lo que garantiza seguridad jurídica y confidencialidad en un proyecto sensible y estratégico como el IA100B. No registra antecedentes negativos en este aspecto.
- Económico: Ofrece un precio competitivo, un 7.5% por debajo del objetivo presupuestado, lo que significa un buen ahorro para FAdeA sin sacrificar calidad. Además, brinda condiciones de pago flexibles (30% adelantado y el resto en diferido), facilitando la gestión financiera del proyecto y cuenta con una excelente solvencia financiera.
- Social: Su buena reputación laboral, relación comercial previa con FAdeA, y respuesta oportuna a consultas reflejan un compromiso confiable y colaborativo, demostrando capacidad de respuesta e historial de cumplimiento.
- Tecnológico: Cumple todos los requisitos técnicos y de cronograma, tiene tecnología de punta y adecuada capacidad instalada para fabricar la pieza en los plazos solicitados, con un margen que permite cierta flexibilidad. Aunque no fabricó antes este producto en específico, ya ha trabajado con FAdeA en proyectos anteriores, lo que reduce riesgos de adaptación o desconocimiento y hace probable un desempeño exitoso.
- Ambiental: Práctica responsable en manejo de residuos, alineándose con las exigencias de la industria.

En conclusión, el Proveedor H se ha considerado la opción más adecuada para la adquisición de la bancada de motor del IA100B, ya que su confiabilidad, experiencia previa con FAdeA, capacidad tecnológica, flexibilidad financiera y compromiso ambiental hacen que su elección no sea solo una decisión basada en precio, sino una estrategia clave para garantizar el éxito y la sostenibilidad del proyecto, proteger la inversión, asegurar la calidad del producto final y facilitar la certificación y puesta en vuelo del avión.

## 4. CONCLUSION

El análisis estratégico de la industria aeronáutica argentina, en particular la selección de proveedores locales mediante la metodología PESTEL, revela la importancia de integrar factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales para fortalecer la cadena de valor. La aplicación de esta herramienta permite identificar proveedores confiables, competitivos y alineados con los estándares de calidad y sustentabilidad requeridos en el sector, además de tomar decisiones informadas basadas en la capacidad de adaptación de cada empresa proveedora a los cambios del entorno macro. Sin embargo, el uso de esta herramienta en un caso específico como la selección de proveedores debe abordarse siempre en combinación con otra herramienta que permita establecer la comparación entre las características intrínsecas de cada empresa proveedora.

En el caso de FAdeA y la adquisición de componentes críticos como la bancada de motor del IA100B, el proceso de evaluación demuestra que proveedores con sólida experiencia, estabilidad financiera, cumplimiento normativo y compromiso ambiental, como el proveedor H, emergen como las opciones más adecuadas. La incorporación de criterios técnicos, comerciales, financieros y de sustentabilidad en la selección no solo reduce riesgos operativos y legales, sino que también promueve una industria aeronáutica más innovadora, responsable y sustentable, contribuyendo al desarrollo económico y tecnológico del país.

En conclusión, el uso del análisis PESTEL permite a las empresas del sector aeronáutico anticipar cambios en su entorno externo y diseñar estrategias de selección de proveedores que sean adaptativas y sostenibles. La comprensión profunda de estos factores es esencial para garantizar una cadena de suministro eficiente, responsable y competitiva en la industria aeronáutica.

En definitiva, la estrategia de selección basada en un análisis integral y multidimensional es clave para garantizar la calidad, seguridad y sostenibilidad de los proyectos aeronáuticos nacionales.

## 5. REFERENCIAS


Banco Mundial. (2022). *Argentina economic overview.* Obtenido de https://www.worldbank.org/en/country/argentina/overview

Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 38*(5), 360-387. Obtenido de https://doi.org/10.1108/09600030810882816

Cousins, P. D., Lamming, R. L., & Squire, B. (2008). Strategic supply management: Principles, theories and practice. International Journal of Operations & Production Management. *28*(3), 241-254. Obtenido de https://doi.org/10.1108/01443570810859891

FAdeA. (2022). *NPF/GCAL/008 Rev C Calificación de Proveedores.*

FAdeA. IPE N° 05.004. (2022). *Instrucciones de Práctica Estándar.*

García, M., & Fernández, L. (2018). Análisis del marco regulatorio del sector aeronáutico en Argentina. *Revista Aeronáutica, 12*(3), 45-59.

ICAO. (2020). *Environmental report of the International Civil Aviation Organization.* Obtenido de https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/default.aspx

Krause, D., Handfield, R. B., & Scannell, T. V. (1998). An empirical investigation of suppier development: Reactive and proactive strategies. *Journal of Operations Management, 17*(1), 30-58. Obtenido de https://doi.org/10.1016/S0272-6963(97)00037-0

Ley N° 27565. (2020). *Creación del Fondo Nacional de la Defensa (FONDEF).*

Ministerio de Defensa. (2020). *El Presidente encabezó la presentación oficial del FONDEF.* Obtenido de Obtenido de https://www.argentina.gob.ar/noticias/el presidente-encabezo-la-presentacion-oficial-del-fondef

Miropolsky, A., Tavella, M., Tavella, D., & Manera, R. (2024). Estudio comparativo de métodos multicriterio. Caso: Selección de proveedores de la industria aeronáutica. *VII Congreso Argentino de Ingeniería - XIII Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería CADI 2024.* San Juan - Argentina.

Pergolini, A. M.-I. (2015). *Diseño y Dimensionamiento de una Bancada Motor.* Obtenido de Trabajo Final de Grado - Instituto Universitario Aeronáticofile:///C:/Users/Usuario/Downloads/TFG_Pergolini.pdf

Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2011). *Creating shared value.* (Vol. 89). Harvard Business Review.

Rezzónico, R. C., & Rezzónico, S. (2012). *Claves para optimizar la gestión del conocimiento en los ámbitos educativos,científicos, profesionales y empresariales.* Córdoba: Tech-Mind-Ed.

Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina. (2020). *Creación del Fondo Nacional de la Defensa (FONDEF) a fin de financiar el proceso de reequipamiento de las Fuerzas Armadas.*

Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production, 16*(15), 1699-1710. Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020

Yüksel, I. (2012). Developing a multicriteria decision making model for PESTEL analysis. *International Journal*.

# EVALUACIÓN Y MEJORA DE LA EFICIENCIA LOGÍSTICA EN UNA DISTRIBUIDORA LOCAL CON ENFOQUE EN EL MODELO SCOR

Giovannelli, Martina; Esteban, Alejandra

*Facultad de Ingeniería, Universidad de Nacional de Mar del Plata.*
martigiovannelli1@gmail.com; aesteban@fi.mdp.edu.ar

**RESUMEN**

La empresa objeto de estudio es una distribuidora de productos alimenticios ubicada en Mar del Plata, provincia de Buenos Aires, Argentina. Su estrategia se basa en la capacitación del personal, la comunicación efectiva y el control de gestión, con el objetivo de mantener altos niveles de eficiencia y satisfacción del cliente. Sin embargo, enfrenta dificultades operativas, como la dependencia de cargas manuales de datos, que generan errores y afectan la calidad de la información utilizada para la toma de decisiones. También presenta problemas en los tiempos de entrega y en la capacidad de respuesta ante variaciones en la demanda. Con el fin de abordar estas problemáticas, se aplicó de forma parcial el modelo SCOR (*Supply Chain Operations Reference*), utilizado para clasificar los procesos logísticos, calcular métricas de desempeño y proponer mejoras específicas. Este enfoque permitió ordenar las actividades según categorías estandarizadas como planificación, abastecimiento y distribución, y establecer una base clara para el análisis. A partir de esta estructura, se definieron indicadores clave de desempeño (KPIs), combinando métricas ya utilizadas por la empresa con nuevos indicadores seleccionados especialmente para evaluar con mayor precisión la eficiencia y confiabilidad de los procesos logísticos. Como complemento, se desarrollaron tableros de control interactivos mediante la herramienta Power BI, que permiten visualizar en tiempo real los indicadores definidos. Estos tableros facilitan el monitoreo constante de la operación, permiten detectar desvíos de forma oportuna y mejoran la capacidad de toma de decisiones basada en datos. En conjunto, la aplicación del modelo SCOR, la incorporación de nuevos indicadores y el desarrollo de herramientas de visualización contribuyen a mejorar la calidad de la información, optimizar los recursos disponibles y fortalecer la gestión logística, elevando así la competitividad y el nivel de servicio de la empresa.

**Palabras Claves:** empresa distribuidora; logística; mejora del desempeño; modelo SCOR; Power Bi

**ABSTRACT**

The company under study is a food products distributor located in Mar del Plata, province of Buenos Aires, Argentina. Its strategy is based on staff training, effective communication and management control, with the objective of maintaining high levels of efficiency and customer satisfaction. However, it faces operational difficulties, such as dependence on manual data uploads, which generate errors and affect the quality of the information used for decision making. It also presents problems in delivery times and in the capacity to respond to variations in demand. In order to address these problems, the SCOR (Supply Chain Operations Reference) model, used to classify logistics processes, calculate performance metrics and propose specific improvements, was partially applied. This approach made it possible to classify activities according to standardized categories such as planning, supply and distribution, and to establish a clear basis for analysis. Based on this structure, key performance indicators (KPIs) were defined, combining metrics already used by the company with new indicators specially selected to more accurately assess the efficiency and reliability of logistics processes. As a complement, interactive dashboards were developed using the Power BI tool, which allow real-time visualization of the defined indicators. These dashboards facilitate the constant monitoring of the operation, allow for the timely detection of deviations and improve the capacity for data-based decision making. Together, the application of the SCOR model, the incorporation of new indicators and the development of visualization tools contribute to improving the quality of information, optimizing available resources and strengthening logistics management, thus increasing the company's competitiveness and service level.

**Keywords:** distributing company; logistics; performance improvement; SCOR model; Power BI

## 1. INTRODUCCIÓN

El trabajo se lleva a cabo en una empresa marplatense, en su unidad de negocio dedicada a la venta y distribución de bebidas en la ciudad de Mar del Plata y sus alrededores. La organización participa en todas las etapas del proceso: compra, almacenamiento, comercialización y distribución de productos. Entre los principales artículos que gestiona se encuentran aguas puras, aguas saborizadas, cervezas, vinos y aperitivos con y sin alcohol, los cuales son entregados a una amplia variedad de clientes, tales como almacenes, autoservicios, bares y balnearios.

Actualmente, la empresa no realiza un seguimiento detallado de todas las etapas de su cadena de suministro, desde la adquisición de los productos hasta su entrega final al cliente. Esta falta de monitoreo integral impide tener una visión clara del desempeño operativo, dificultando la identificación de desvíos, cuellos de botella o ineficiencias en los procesos logísticos. La implementación de un sistema de evaluación de desempeño a través de indicadores específicos permitirá detectar con mayor precisión aquellas actividades cuyo rendimiento se aparta de los valores esperados, facilitando la toma de decisiones correctivas y estratégicas.

Realizar un análisis profundo de la cadena de suministro se vuelve esencial, especialmente considerando que actualmente no se la evalúa de forma global. La empresa cuenta con un gran volumen de información generado en sus distintas operaciones, sin embargo, gran parte de esos datos no son procesados ni aprovechados adecuadamente. Determinar qué información es relevante, cómo debe organizarse y a quién debe estar dirigida, resulta clave para transformar datos dispersos en conocimiento útil para la gestión. Esta situación representa una oportunidad para diseñar un sistema de control que priorice la información pertinente para cada responsable, agilizando así la gestión y aumentando la eficiencia general.

En este contexto, el presente trabajo propone un sistema de evaluación de desempeño basado en el modelo SCOR (*Supply Chain Operations Reference*), a partir de aplicar principalmente su estructura de métricas como herramienta para medir y mejorar la eficiencia de la cadena. El modelo SCOR proporciona una arquitectura común para mejorar los procesos de la cadena de suministro, mediante una estructura de referencia que permite comparar el desempeño, identificar brechas y aplicar mejores prácticas a lo largo de toda la red de valor" (Bolstorff & Rosenbaum, 2007). Este modelo, proporciona una descripción de los procesos de la cadena de suministro, un marco para las relaciones entre estos procesos y un conjunto de métricas para medir el rendimiento de los procesos (Chopra & Meindl, 2013). Con esto se busca medir el desempeño, organizar la información disponible y transformarla en conocimiento útil para la toma de decisiones. El modelo SCOR organiza sus procesos en cinco categorías principales: *Plan, Source, Make, Deliver* y *Return,* lo que permite una gestión integral de la cadena de suministro (Association for Supply Chain Management [ASCM], 2022). Su aplicación, adaptada a las necesidades de la organización, aportará valor al permitir una mejora continua orientada especialmente al servicio de entregas.

El objetivo de este trabajo es utilizar el modelo SCOR para analizar la cadena de suministro de la empresa distribuidora y evaluar su desempeño.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Situación actual de la empresa

La empresa bajo estudio se dedica a la compra, almacenamiento, venta y distribución de bebidas y cuenta con un centro de distribución en la ciudad de Mar del Plata, desde donde se realizan entregas en la ciudad y localidades cercanas como Balcarce, Necochea, Miramar, Mar Chiquita, Santa Clara, Chapadmalal y Batán. A partir de reuniones con la Gerencia y referentes clave, así como del acceso a informes y reportes de interés, se realiza un análisis de la organización.

La empresa distribuye principalmente bebidas con alcohol (cervezas, vinos y espumantes) y sin alcohol (aguas puras y saborizadas), complementadas por algunos artículos de almacén. Sus proveedores son grupos empresariales destacados en el sector y sus clientes incluyen almacenes, autoservicios, bares, balnearios, restaurantes y kioscos. Atiende a unos 400 clientes diarios en promedio, con variaciones estacionales. Para la distribución utiliza una flota de 20 camiones y 3 camionetas. Cuenta con un depósito propio de 3000 m² y dentro del mismo se utilizan transpaletas hidráulicas y autoelevadores.

La empresa está conformada por un total de 400 empleados distribuidos en distintas unidades de negocio. En la Figura 1 se puede ver el organigrama, que presenta una estructura departamentalizada funcional.

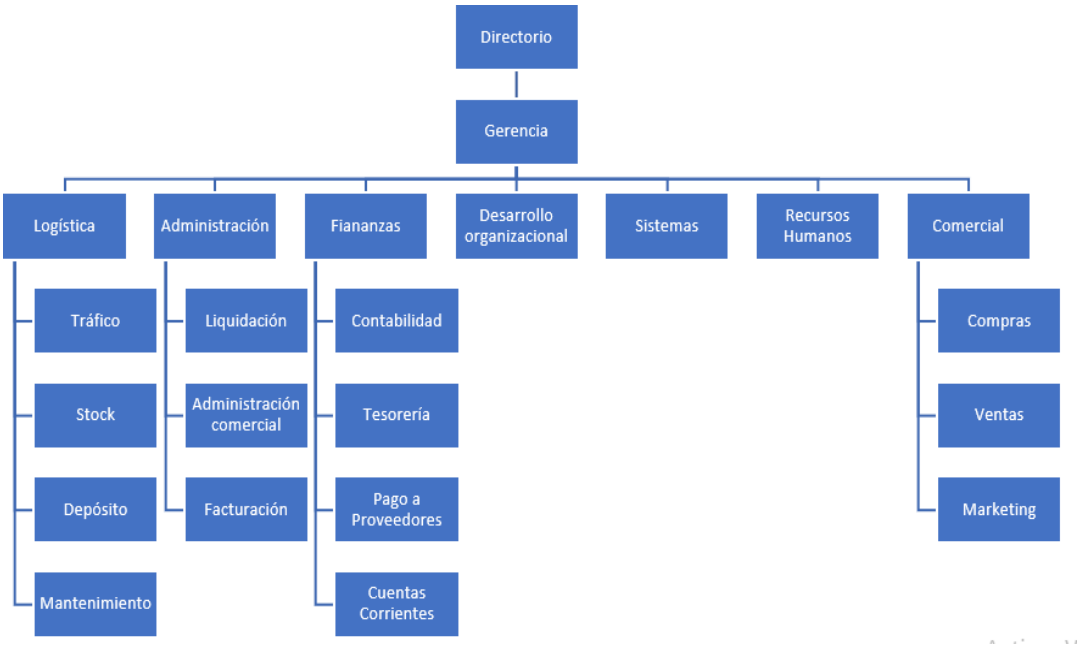



*Figura 1 Organigrama empresarial*
*Fuente: Elaboración propia en base a datos de la empresa*

Su estructura organizativa se desarrolla en tres niveles: en la cúspide se encuentra el Directorio como supervisor y máxima autoridad, seguido por la Gerencia General, que coordina todas las áreas funcionales. En el tercer nivel se ubican las principales áreas: Logística (con las subáreas de tráfico, stock, depósito y mantenimiento), Administración (con las subáreas de liquidación, administración comercial y facturación), Finanzas (con las subáreas de contabilidad, tesorería, pago a proveedores y cuentas corrientes), Desarrollo Organizacional, Sistemas, Recursos Humanos y Comercial (con las subáreas de compras, ventas y marketing). Cada área tiene un jefe responsable y se organiza de forma horizontal, lo que fomenta un ambiente colaborativo y una estrecha relación entre las distintas funciones. Esto permite una alineación eficiente hacia los objetivos estratégicos de la empresa. El área de Logística, especialmente las subáreas de Tráfico y Depósito son el foco de este análisis, mientras que las áreas de Administración y Comercial actúan como soporte clave en la cadena de suministro.

### 2.2. Diagrama de bloques y descripción de procesos

En la Figura 2, se presenta el diagrama de bloques completo con las actividades operativas pertenecientes a la cadena de suministro. Está dividido según las áreas responsables de cada una. Según Bowersox, Closs y Cooper (2007), la logística, como elemento central de ese sistema, contempla todas las actividades necesarias para trasladar productos e información entre los eslabones de la cadena, asegurando que lleguen al destino correcto, en el tiempo adecuado y con el nivel de servicio requerido.




*Figura 2 Diagrama de bloques*
*Fuente: Elaboración propia en base a datos de la empresa*

A partir de los procesos presentados, se hace un pequeño resumen de cada uno. El proceso de compra y abastecimiento es responsabilidad de las áreas de Administración Comercial y Compras, quienes realizan pedidos basados en el stock y acuerdos comerciales. Se planifican con anticipación los artículos de alta rotación, y se coordina la recepción con los proveedores. Estas tareas corresponden al proceso *Source* del modelo SCOR. La gestión de almacenamiento y preparación de pedidos comienza con la recepción de la mercadería, su verificación y ubicación en depósito dependiendo si es para acopio o para armado de pedidos. Las ventas se gestionan por preventa (con visita a clientes) y venta telefónica. Luego del ingreso de pedidos al sistema, el área de Tráfico asigna la carga a camiones en base a capacidad de carga y ubicación geográfica, combinando procesos automáticos y manuales. Se emiten las facturas y hojas de ruta, y se arma cada pedido por vehículo. La carga se realiza con turnos organizados por zona y capacidad de los camiones. Aquí intervienen los procesos *Deliver* y *Plan* del modelo SCOR. Los fleteros entregan la mercadería según la factura, cobran y mantienen contacto con tráfico para resolver incidentes. Todo este flujo se encuadra en el proceso *Deliver*. Por último, la gestión de devoluciones y rechazos contempla la identificación de mercadería devuelta, el registro de causas de rechazo, emisión de notas de crédito y rendición final del reparto. Estas actividades corresponden al proceso *Return* del modelo SCOR.

### 2.3. Indicadores actuales

La empresa lleva un control sistemático de indicadores logísticos que le permiten evaluar y optimizar el desempeño de su cadena de suministro. Estos indicadores están principalmente enfocados en la gestión de entregas y en los procesos de preparación de pedidos. El principal inconveniente es que las fuentes de información son diversas y no se encuentran estandarizadas ni organizadas de forma prolija, lo que dificulta la realización de los cálculos y la consolidación de los datos en un único soporte.

En las áreas de Depósito y Tráfico se monitorean indicadores operativos y económicos para evaluar la eficiencia y costos logísticos. En Depósito, se controlan aspectos como la ocupación del espacio, productividad del personal y rendimiento de equipos, junto con costos por bulto y por posición. En Tráfico, se miden volúmenes entregados, uso de flota, rechazos y costos de distribución en relación a la facturación, lo que permite tomar decisiones estratégicas orientadas a mejorar el desempeño.

### 2.4. Elección y cálculo de métricas SCOR

Para evaluar el desempeño de la empresa en términos de servicio y satisfacción del cliente, es necesario incorporar métricas del modelo SCOR enfocadas en la confiabilidad. Actualmente, la organización utiliza solo un indicador relacionado con la efectividad de las entregas (% de bultos rechazados), el cual ofrece una visión limitada, ya que no permite identificar causas ni asociar rechazos con etapas específicas del proceso. Implementar métricas SCOR centradas en el cliente, como la precisión de pedidos, el cumplimiento de plazos y la correcta documentación, permitiría detectar fallas con mayor detalle, optimizar recursos, reducir costos por reprocesos y mejorar la gestión del inventario. Esto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que fortalece la relación con los clientes, promoviendo la fidelización a largo plazo.

Las métricas de Confiabilidad del modelo SCOR están orientadas a medir el nivel de servicio, clave para asegurar entregas puntuales, completas y en condiciones adecuadas, lo que genera ventajas competitivas y mejora la eficiencia operativa. A continuación, se resumen las métricas seleccionadas:

RL.1.1 - Cumplimiento de la Orden Perfecta (métrica de nivel 1. Proporciona una visión general de desempeño)

Evalúa el desempeño general de la cadena desde la perspectiva del cliente. Una orden perfecta cumple con entrega a tiempo, completa, sin daños y con documentación correcta. Se calcula mediante la Ecuación (1).

$$\text{Cumplimiento de la Orden Perfecta} = \frac{Número\ de\ órdenes\ perfectas}{Total\ de\ órdenes\ entregadas} \times 100\% \quad (1)$$

RL.2.1 - Órdenes Entregadas Completas (métrica de nivel 2. Detalla causas)

Mide si las órdenes contienen todos los ítems solicitados en las cantidades correctas. Se calcula mediante la Ecuación (2).

$$\text{Órdenes Entregadas Completas} = \frac{Órdenes\ entregadas\ completas}{Total\ de\ órdenes\ entregadas} \times 100\% \quad (2)$$

RL.2.2 - Entrega al Cliente en la Fecha y Hora Acordada (métrica de nivel 2. Detalla causas)

Evalúa si los pedidos se entregan puntualmente, en el día y hora comprometidos. Se calcula mediante la Ecuación (3).

$$\text{Entrega al Cliente en la Fecha y Hora Acordada} = \frac{Órdenes\ entregadas\ puntualmente}{Total\ de\ órdenes\ entregadas} x\ 100\% \quad (3)$$

RL.2.3 - Documentación Precisa (métrica de nivel 2. Detalla causas)

Mide si las órdenes se entregan con la documentación completa y sin errores. Se calcula mediante la Ecuación (4).

$$\text{Documentación precisa} = \frac{Órdenes\ entregadas\ con\ documentacion\ precisa}{Total\ de\ órdenes\ entregadas} \times 100\% \quad (4)$$

RL.2.4 - Condición Perfecta (métrica de nivel 2. Detalla causas)

Evalúa si los productos llegan en buen estado, sin daños ni deterioro. Se calcula mediante la Ecuación (5).

$$\text{Condición perfecta} = \frac{Órdenes\ entregadas\ en\ condición\ perfecta}{Total\ de\ órdenes\ entregadas} x\ 100\% \quad (5)$$

Para calcular estas métricas, se utilizarán los rechazos (devoluciones) diarios como base para medir la efectividad de las entregas. Cada rechazo tiene un motivo y un responsable asociado, que puede corresponder a las áreas de Distribución, Depósito, Ventas o Stock. Una pequeña parte de los rechazos no se puede atribuir a un sector específico de la empresa, ya que responden a causas externas o imprevistas.

En total, se identificaron 16 motivos de rechazo (R1 a R16), entre los que se pueden mencionar "Rotura de mercadería", "Cerrado en horario de entrega", "Sin stock" y "No lo quiso el cliente". Cada uno de estos motivos está vinculado a una métrica específica de nivel 2 (RL 2.1 a RL 2.4) y tiene asignada un área responsable. Los motivos de rechazo se presentan en la Tabla 1.

*Tabla 3 Motivos de rechazos*
*Fuente: Elaboración propia en base a datos de la empresa*

| ID | Descripción del rechazo | Métrica con la que se relaciona | Área responsable |
|---|---|---|---|
| R.1 | ROTURA DE MERCADERÍA | RL. 2.4 | Tráfico |
| R.2 | CALLE BLOQUEADA/ INTRANSITABLE | RL. 2.2 | Causa circunstancial |
| R.3 | CERRADO EN HORARIO DE ENTREGA | RL. 2.2 | Tráfico |
| R.4 | DIFERENCIAS CON LA MERCADERÍA PEDIDA | RL 2.1 | Ventas/Trafico/Deposito |
| R.5 | VISITADO FUERA DE HORA/SIN VISITAR | RL 2.2 | Tráfico |
| R.6 | ERROR CARGA DEPÓSITO/FALTANTE | RL 2.1 | Tráfico |
| R.7 | SIN STOCK | RL 2.1 | Ventas/Stock/Sistemas |
| R.8 | NO RECIBE ENTREGAS PARCIALES | RL 2.4 | Circunstancial |
| R.9 | PRODUCTO MAL FACTURADO/SIN NOTA DE CRÉDITO | RL 2.3 | Facturación |
| R.10 | NO PEDIDO | RL 2.1 | Ventas |
| R.11 | NO ERA EL PRECIO ACORDADO | RL 2.4 | Ventas |
| R.12 | NO LO QUISO EL CLIENTE | RL 2.4 | Ventas |
| R.13 | FUERA DE ZONA | RL 2.2 | Tráfico |
| R.14 | NO RECIBE - FECHA CORTA | RL 2.4 | Depósito / Stock |
| R.15 | SIN DINERO | RL 2.3 | Ventas |
| R.16 | SIN ENVASES | RL 2.3 | Circunstancial |

Para calcular las métricas de confiabilidad, se adecúa la información disponible a partir de una planilla de Excel completada diariamente por el área de Tráfico. Esta planilla registra los rechazos e incluye datos como la fecha, fletero, cliente, cantidad de bultos rechazados, facturación rechazada, motivo y vendedor. En este contexto, cada "orden" se asocia a un cliente, por lo que cada pedido equivale a una orden. El primer paso del proceso consiste en clasificar cada rechazo según la métrica de nivel 2 correspondiente. Luego, se agrupa la información por día, contabilizando cuántos clientes tuvieron al menos un rechazo vinculado a cada métrica. A la vez, se obtiene la cantidad total de clientes facturados por día desde el sistema propio de la empresa. Con estos datos, se calculan las métricas diarias y, con los totales, se obtiene un valor representativo del periodo. En este caso, el periodo seleccionado es el año 2024. Para el cálculo de la métrica de nivel 1, se considera simplemente el total de clientes con algún rechazo y el total de clientes facturados por día, sin distinguir el tipo de defecto. Además, se definen valores objetivo junto a la gerencia, en función de la estrategia y capacidad operativa de la empresa. Estos objetivos buscan equilibrar las expectativas del cliente con lo que la organización puede sostener de forma eficiente. Se presentan los resultados en la Tabla 2.

*Tabla 2 Resultado del cálculo de métricas.*
*Fuente: elaboración propia*

| Métrica | Resultado | Valor objetivo |
|---|---|---|
| RL 1.1 | 92,8% | 98% |
| RL 2.1 | 94,4% | 99% |
| RL 2.2 | 99,4% | 98% |
| RL 2.3 | 99,5% | 98% |
| RL 2.4 | 99,1% | 98% |

Como se puede observar, la métrica RL 1.1, que refleja el desempeño general de la confiabilidad, se encuentra por debajo del valor objetivo establecido. Al analizar en detalle las métricas de nivel 2, que funcionan como un diagnóstico de esta, se identifica que la mayor desviación corresponde a la RL 2.1, vinculada a la entrega completa de las órdenes.

### 2.5. Análisis de Pareto

Se realizó un análisis de Pareto con el objetivo de evaluar la frecuencia de aparición de cada uno de los motivos de rechazo registrados y su impacto en las métricas de desempeño, en particular sobre aquellas que presentan mayores desvíos respecto a los objetivos establecidos. Este análisis permite identificar cuáles son las causas principales que generan devoluciones y afectan la efectividad de las entregas.

El resultado del diagrama de Pareto se presenta en la Figura 3 y muestra que un número reducido de motivos concentra la mayoría de los rechazos. En especial, el motivo "Sin stock" representa cerca del 60% del total, posicionándose como la principal causa a resolver. Junto con otros cuatro motivos: "No pedido", "Cerrado en horario de entrega", "Sin dinero" y "No lo quiso el cliente", se supera el 80% del total de rechazos, validando así el principio de Pareto. Para lograr una visión más detallada del resto de los motivos, se realizó un segundo análisis excluyendo el rechazo por "Sin stock", lo que permitió visualizar con mayor claridad otras causas relevantes que, en el gráfico original, quedaban opacadas por su peso relativo. Se presenta en la Figura 4.

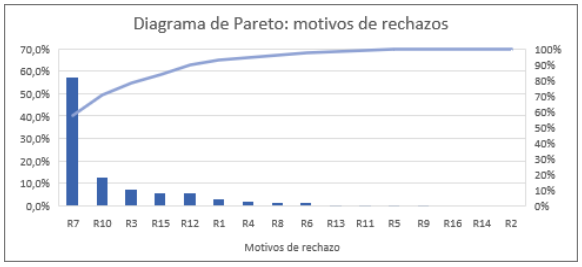



*Figura 3 Diagrama de Pareto*
*Fuente: Elaboración propia en base a datos de la empresa*

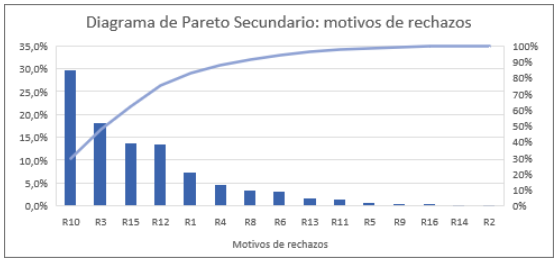



*Figura 4 Diagrama de Pareto secundario*
*Fuente: Elaboración propia en base a datos de la empresa*

Este análisis secundario muestra que, sin considerar el "Sin stock", el motivo con mayor impacto es "No pedido", con cerca del 30% de los rechazos. Le siguen "Cerrado en horario de entrega", "Sin dinero" y "No lo quiso el cliente", con valores cercanos al 15-18%, y finalmente "Rotura de mercadería", con un porcentaje menor pero igualmente significativo. Estas cinco causas representan el 80% de los rechazos restantes, lo que evidencia la necesidad de trabajar no solo sobre el inventario, sino también en los procesos comerciales y logísticos, ya que muchos de estos rechazos podrían evitarse con una mejor planificación, comunicación y gestión.

El análisis de resultados muestra que la métrica que más se aleja del objetivo es la RL 2.1, que mide el porcentaje de órdenes entregadas completas. Esta métrica se ve directamente afectada por motivos como "Sin stock", "Diferencias con la mercadería pedida", "Pedidos erróneos" y "Errores en el depósito", reflejando dificultades para cumplir con los requerimientos del cliente. La principal causa, "Sin stock", puede estar relacionada con errores en el sistema, desajustes entre el stock físico y el registrado, fallas en la gestión de ventas o consumos inesperados del inventario. Por su parte, el rechazo por "No pedido"

suele atribuirse a errores del área de Ventas, como la carga incorrecta de pedidos o su asignación a clientes equivocados. Aunque con menor incidencia, los rechazos por "Diferencias con la mercadería pedida" y "Error de carga en depósito/faltante" también reflejan fallas en los procesos de armado y descarga de pedidos.

En cambio, las métricas RL 2.2 (entregas puntuales), RL 2.3 (documentación precisa) y RL 2.4 (entrega en condiciones adecuadas) se mantienen dentro de los parámetros esperados, lo que indica un buen desempeño en estos aspectos. Entre los otros motivos de rechazo, “Cerrado en horario de entrega” responde a causas externas a la operación logística, “Sin dinero” es una responsabilidad del cliente, y “No lo quiso el cliente” implica una problemática comercial, ya que representa un costo operativo adicional al tener que retornar la mercadería, sin que existiera un error logístico asociado.

### 2.6. Propuesta de sistema de control, comunicación y visualización

En base al análisis realizado, se propone desarrollar un tablero de control integral que combine indicadores que la empresa ya utiliza habitualmente con otros nuevos seleccionados específicamente para fortalecer la evaluación y mejora de los procesos logísticos. Esta integración permitirá un seguimiento más completo del desempeño y una identificación más precisa de oportunidades de mejora. El tablero se organizará en tres secciones: Depósito, Tráfico y Rendimiento de Entregas y Métricas SCOR, con el objetivo de abordar de manera detallada los distintos aspectos operativos. Los indicadores incorporados, junto con los valores objetivo de las métricas SCOR, permitirán un seguimiento más preciso del desempeño de la cadena de suministro. Para esto, se eligió Power BI como herramienta debido a su integración directa con Excel, que es el formato donde se encuentra la información de la empresa, permitiendo importar y actualizar datos fácilmente y reducir errores. Además, la empresa cuenta con analistas capacitados en Power BI, lo que facilita el desarrollo y mantenimiento de los tableros sin necesidad de apoyo externo. La gerencia también está familiarizada con la herramienta, lo que favorecerá su adopción y uso efectivo para la toma de decisiones. Power BI es una herramienta de inteligencia empresarial desarrollada por Microsoft que permite transformar datos en información visual e interactiva, facilitando la toma de decisiones. Se utiliza principalmente para crear paneles, informes dinámicos y análisis de datos en tiempo real, siendo muy valorada por su capacidad de conectarse a múltiples fuentes de datos y su facilidad para compartir información dentro de las organizaciones (Powell, 2021).

### 2.7. Extracción y adecuación de los datos

La empresa utiliza un sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) de desarrollo propio, basado en Visual FoxPro y SQL Server, que integra todas las áreas operativas como Compras, Stock, Pedidos, Facturación, Logística, Cuentas contables y Clientes. Si bien este sistema permite exportar datos a Excel para generar reportes, los formatos son fijos y presentan limitaciones en cuanto a personalización, por lo que el área de Sistemas genera reportes automáticos diarios adaptados a las necesidades de cada sector. En caso de requerir información específica, también pueden solicitarse archivos personalizados. La consistencia de estos reportes se valida cruzando información con otras áreas. A pesar de la automatización lograda, aún existen ciertos datos operativos no sistematizados que deben ser registrados manualmente en planillas Excel por los responsables de depósito y tráfico. Las principales fuentes automáticas incluyen información sobre ventas, entregas, productos, clientes y facturación, mientras que las planillas manuales se complementan con datos sobre armado de pedidos, ingresos de proveedores, uso del autoelevador, ocupación del depósito, kilómetros recorridos, trazabilidad de entregas y capacidad de carga. Con todas estas bases, se realizó una adecuación de los datos para su uso en Power BI. Este proceso incluyó limpieza y estructuración en Excel para asegurar la compatibilidad, seguido de la importación de las tablas al entorno de Power BI. Allí se construyó un modelo relacional con vínculos entre las distintas fuentes a través de campos clave, y se incorporaron dos tablas auxiliares: una base de fechas como eje temporal y otra de repartos únicos para consolidar los datos logísticos. Este modelo permitió integrar, analizar y visualizar de manera dinámica y confiable el desempeño de la cadena de suministro.

### 2.8. Elección de los indicadores y diseño de los tableros

En los tres tableros desarrollados se encuentra, en la parte superior, un menú de navegación que permite alternar entre las tres páginas del informe. La página seleccionada se muestra siempre

resaltada para facilitar su identificación. Debajo del menú, todos los tableros incluyen un filtro de fechas que permite seleccionar tanto un día específico como un rango de tiempo, brindando flexibilidad en el análisis de los datos. Los datos presentados en este tablero son puramente ilustrativos y no corresponden a información real de la empresa.

En la Figura 5, se presenta el tablero de Depósito. El mismo permite monitorear de forma clara y completa las principales actividades logísticas, como armado de pedidos, carga y descarga de camiones e ingreso de proveedores. Incluye indicadores clave como ocupación del depósito, productividad del personal, uso de autoelevadores y volumen de trabajo diario. A través de visualizaciones interactivas, como gráficos de evolución, rankings por familias de productos y distribución del uso de recursos, se facilita el análisis del rendimiento y la toma de decisiones operativas basadas en datos precisos y actualizados.




*Figura 5 Tablero de control depósito*
*Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 6, se puede observar el tablero de control del área de Tráfico. Este ofrece una visión clara y detallada de la operación de distribución. Incluye indicadores clave como bultos entregados, clientes atendidos, uso de vehículos, ocupación de unidades, kilómetros recorridos y porcentaje de entregas rechazadas. Además, incorpora datos de seguimiento como la distribución geográfica de las entregas y el tiempo promedio por cliente, lo que permite evaluar eficiencia, cobertura y calidad del servicio. Las visualizaciones dinámicas permiten filtrar por fechas, localidades o vehículos y se actualizan automáticamente para un análisis más preciso. El diseño facilita la comparación entre resultados y objetivos mediante una codificación tipo semáforo que destaca el nivel de desempeño. Todo esto permite identificar desvíos, optimizar rutas, gestionar mejor los recursos y mejorar la experiencia del cliente.




*Figura 6 Tablero de control tráfico*
*Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 7, se presenta el tablero de Rendimiento de Entregas. Este tablero, alineado con las métricas SCOR, permite evaluar de forma integral la eficacia del proceso logístico. Incluye indicadores clave como bultos entregados y rechazados, clientes con y sin inconvenientes, y métricas SCOR sobre cumplimiento, precisión y calidad, comparadas con valores objetivo. También incorpora datos detallados de rechazos por motivo, vehículo y área responsable, para identificar causas y responsabilidades. El diseño mantiene el formato de los tableros anteriores e incluye visualizaciones interactivas que permiten filtrar y profundizar en el análisis. Se destacan tablas y gráficos que facilitan la detección de desvíos y la toma de decisiones correctivas, contribuyendo a mejorar el servicio, reducir errores y alinear la operación con los estándares de desempeño logístico.




*Figura 7 Tablero de control rendimiento*
*Fuente: Elaboración propia*

### 2.9. Propuesta de mejora y mejores prácticas SCOR

El análisis de la cadena de suministro de la empresa identificó puntos críticos para mejorar el desempeño, vinculados a procesos clave del modelo SCOR, especialmente *Plan* y *Source*. Los rechazos por falta de stock, que afectan la calidad del servicio, están relacionados con la planificación y gestión de inventarios. Una de las soluciones implementadas fue la incorporación de stocks de seguridad, alineados con las mejores prácticas de planificación del modelo SCOR. Esta medida ya fue aplicada y arrojó resultados positivos, contribuyendo a reducir significativamente los rechazos asociados a la falta de stock.

También se destaca la necesidad de un responsable que se encargue de gestionar de forma eficaz y ágil los problemas operativos que requieren atención inmediata, coordinando las áreas Comercial, Logística, Compras y Stock. De esta manera se promueve una alineación funcional, concepto esencial en SCOR, que busca sincronizar funciones para trabajar hacia objetivos comunes. La planificación precisa de la demanda, otra práctica SCOR, es clave para reducir rechazos derivados de problemas comerciales, mejorando la comunicación con clientes y la gestión de órdenes.

Para problemas operativos como “Cerrado en horario de entrega”, se propone a largo plazo implementar un Sistema de Gestión del Transporte (TMS), que mejore la ejecución del proceso *Deliver* de SCOR, optimizando rutas, seguimiento y comunicación con clientes. Además, se sugieren mejoras en recepción y almacenamiento para agilizar el proceso *Source*.

Se identificó que la carga manual de datos compromete la calidad de la información, afectando la precisión en la toma de decisiones. Por eso, se recomienda automatizar la captura de datos con herramientas tecnológicas, tales como aplicaciones móviles que registren en tiempo real las actividades, mejorando el control de los procesos, práctica también alineada con SCOR para evitar errores operativos. Para registros manuales, se propone estandarización y capacitación, asegurando consistencia y calidad en la información que alimenta la cadena de suministro. Así, todas las acciones propuestas buscan fortalecer los procesos modelo, contribuyendo a una cadena de suministro más eficiente, confiable y orientada a la satisfacción del cliente.

## 3. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo se logró aplicar parcialmente el modelo SCOR, centrado en aquellos procesos y métricas que resultaban pertinentes y viables, manteniendo el enfoque del modelo como marco de análisis para evaluar el desempeño de la cadena de suministro de una empresa distribuidora, enfocándose especialmente en el área de Distribución. Se identificaron las etapas clave de la cadena y se analizaron sus procesos, detectando puntos críticos que afectan la eficiencia operativa.

Se definieron métricas alineadas al modelo SCOR para evaluar el rendimiento, y mediante un análisis de Pareto se identificaron las principales causas de desviaciones en las entregas. Esto permitió priorizar acciones de mejora en los factores con mayor impacto.

Además, se revisó la gestión actual de la información operativa, proponiendo mejoras para garantizar la calidad y disponibilidad de los datos requeridos para el monitoreo de indicadores. También se diseñó un sistema de control y comunicación de métricas, adaptado a los distintos niveles de la organización, con el objetivo de apoyar la toma de decisiones.

Las propuestas de mejora desarrolladas se basaron en buenas prácticas del modelo SCOR, aplicadas según el tipo de proceso, y una de ellas mostró resultados positivos al implementarse. En conjunto, estas acciones buscan no solo corregir fallas actuales, sino también establecer una base para una mejora continua en la gestión logística de la empresa.

## 4. REFERENCIAS

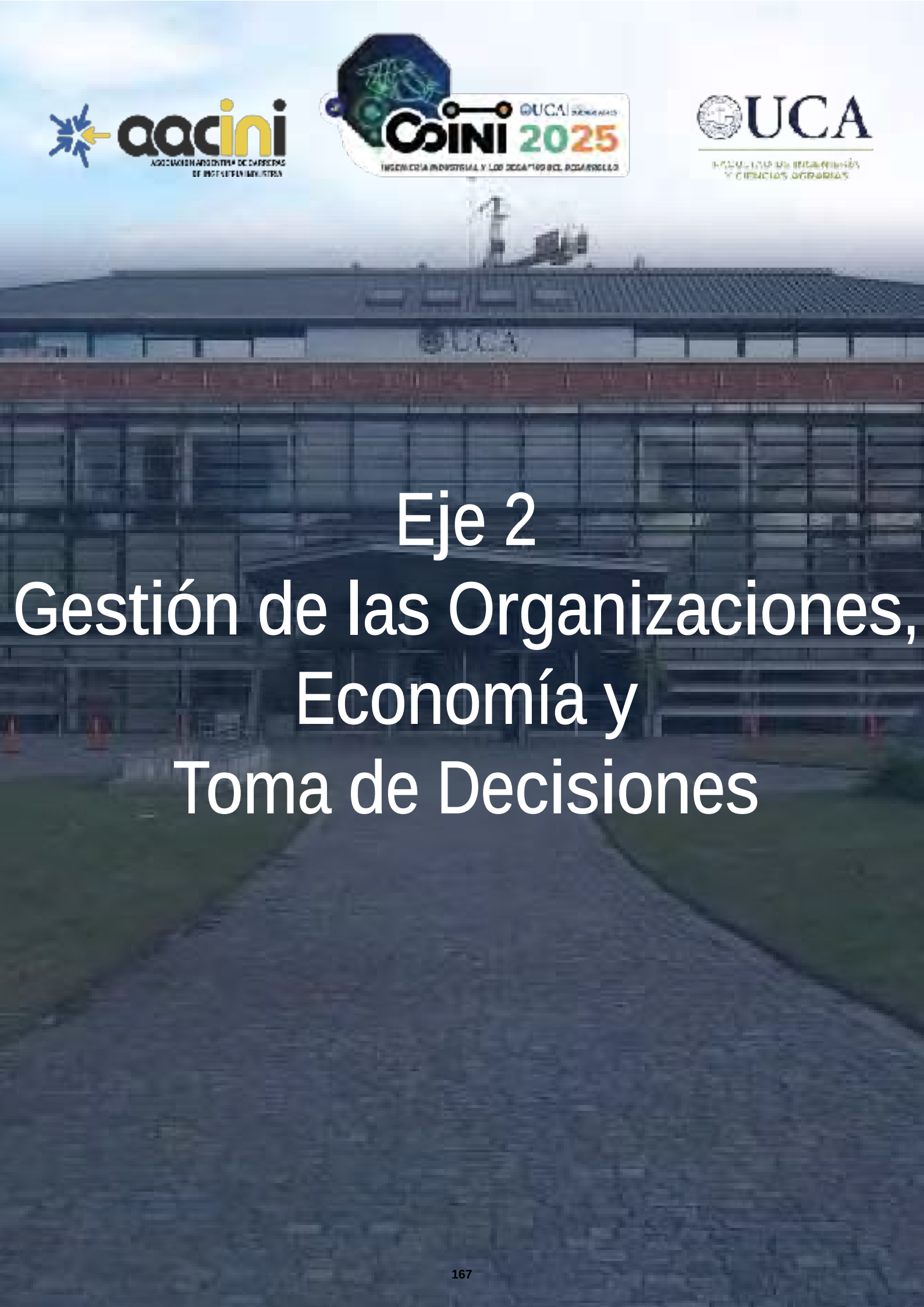

Association for Supply Chain Management. SCOR model. Recuperado de https://www.ascm.org/

Bolstorff, P. & Rosenbaum, R. G. (2007). *Supply Chain Excellence: A Handbook for Dramatic Improvement Using the SCOR Model* (2.ª ed.). AMACOM.

Bowersox, D. J., Closs, D. J., & Cooper, M. B. (2007). *Administración y logística en la cadena de suministros* (2.ª ed.). McGraw-Hill.

Chopra, S. & Meindl, P. (2013), *Administración de la cadena de suministro*. Pearson Educación. 5ta. Ed.

Powell, M. (2021). *Mastering Microsoft Power BI: Expert techniques for effective data analytics and business intelligence*. Packt Publishing.



# Eje 2
# Gestión de las Organizaciones, Economía y Toma de Decisiones

# LA INGENIERÍA DE LA EXPERIENCIA PARA LA TRANSFORMACIÓN ORGANIZACIONAL

Couselo, Romina; Blasotta, Nicolás; Williams, Eduardo; Pendón, Manuela

*Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.*
*romina.couselo@ing.unlp.edu.ar*

**RESUMEN**

En un mercado en constante evolución y competitivo, las organizaciones están bajo la creciente presión de establecer conexiones emocionales duraderas con sus clientes; esto representa una oportunidad. El desafío, permite aprovechar la economía emocional a través de la Ingeniería de la Experiencia y convertir la gestión organizacional en un proceso medible y sistemático.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo se basa en proponer un modelo de proceso que facultará a las empresas para diseñar, gestionar y optimizar cada punto de contacto de manera metódica y transformarlo en una experiencia memorable que promueva la satisfacción del cliente y lealtad, así como el éxito organizacional.

El modelo abarca la cultura organizacional, los recursos humanos como pilar, la comunicación interna y externa y flujos de información. Adicionalmente, agrupa las etapas del marketing, la atención al cliente y la experiencia del usuario, incorpora indicadores de gestión para la retroalimentación y optimización del proceso. Proceso de Diseño Experiencial y sus tres fases interdependientes: 1-Investigación y Mapeo Emocional: diseño de la experiencia, ejecución de los diseños; 2-Medición y Evaluación: cuantificación del impacto emocional y de negocios y optimización; 3-Mejora Continua: análisis de datos y ajustes iterativos al proceso de diseño e implementación.

La implementación del método permite que las empresas no solo ofrezcan bienes o servicios, sino experiencias que generan valor y competitividad

Palabras Claves: Experiencia, Cliente, Estrategia

**ABSTRACT**

In a constantly evolving and competitive market, organisations are under increasing pressure to establish lasting emotional connections with their customers; this represents an opportunity. The challenge is to leverage the emotional economy through Experience Engineering and turn organisational management into a measurable and systematic process.

Therefore, the objective of this work is to propose a process model that will enable companies to design, manage and optimise each point of contact in a methodical way and transform it into a memorable experience that promotes customer satisfaction and loyalty, as well as organisational success.

The model encompasses organisational culture, human resources as a pillar, internal and external communication, and information flows. Additionally, it groups together the stages of marketing, customer service, and user experience, incorporating management indicators for feedback and process optimisation. Experiential Design Process and its three interdependent phases: 1-Research and Emotional Mapping: experience design, design execution; 2-Measurement and Evaluation: quantification of emotional and business impact and optimisation; 3-Continuous Improvement: data analysis and iterative adjustments to the design and implementation process.

The implementation of the method allows companies to offer not only goods or services, but experiences that generate value and competitiveness.

**Keywords: Experience, Customer, Strategy**

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad de la economía centrada en la experiencia, la competitividad empresarial ya no se determina exclusivamente por la calidad del producto o los costos, sino por la habilidad de crear experiencias que refuercen la relación con los clientes y, de manera cada vez más reconocida, con los empleados. La Ingeniería de la Experiencia (IE) se presenta como un enfoque sistemático que integra el diseño, la psicología y la optimización de procesos para generar interacciones significativas.

La IE constituye una disciplina que tiene la capacidad de estructurar y sistematizar la gestión de las interacciones entre la organización y sus clientes, mediante la fusión de metodologías de ingeniería, gestión de procesos y psicología aplicada. De acuerdo con Grötsch (2018), la IE excede los límites de la atención al cliente o del diseño intuitivo de servicios; ofrece un marco medible de manera rigurosa que convierte cada punto de contacto en una oportunidad para crear valor emocional y competitivo.

No obstante, muchos de los modelos existentes se enfocan en el cliente externo, pasando por alto un elemento crucial: la experiencia interna. Estudios recientes (Heskett, Sasser & Schlesinger, 1994; Grötsch, 2018) así como la teoría de la Cadena Servicio-Beneficio evidencian que la satisfacción y el compromiso de los empleados afectan de manera directa la percepción del cliente y los resultados financieros. Desde esta perspectiva, la integración de la IE con un enfoque desde adentro hacia afuera facilita la alineación de la cultura, los procesos internos y las capacidades humanas con la propuesta de valor del mercado.

Este estudio presenta un modelo adaptado al sector industrial que aplica la IE tanto a la experiencia del cliente como a la experiencia interna del empleado, demostrando la relación entre ambas a través de un caso piloto en MetalSur, un fabricante argentino de acero plano.

En sectores *business to business* -B2B-, como las industrias metalmecánica, química o automotriz, el valor emocional puede no ser evidente, ya que las relaciones suelen estar mediadas por contratos, especificaciones técnicas y grandes volúmenes de compra. Sin embargo, un proceso de entrega confiable crea un sentido de seguridad, lo cual representa un valor emocional. Esto se complementa con la accesibilidad y empatía de un equipo técnico, que ayuda a reducir la ansiedad en caso de fallos o imprevistos. Igualmente, una plataforma digital clara y proactiva contribuye a transmitir control y transparencia.

Estos aspectos emocionales ejercen una influencia directa en las decisiones racionales de recompra y fidelización, al minimizar los riesgos percibidos y los costos ocultos para el cliente.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

Desarrollar e implementar un modelo de Ingeniería de la Experiencia Integrada en el ámbito industrial que potencie de manera simultánea la experiencia del cliente y la experiencia interna dentro de las empresas del sector, fortaleciendo así la propuesta de valor y optimizando la eficiencia organizacional.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Ajustar la metodología de IE propuesta por Grötsch (2018) al entorno B2B del sector industrial.
- Incluir métricas tanto emocionales como operativas, abarcando indicadores externos (*Net Promoter Score* -NPS- indicador que mide la lealtad y satisfacción de los clientes de una empresa, Índice de Valor Emocional -EVI- un método para cuantificar las emociones que influyen en las ventas) y también internos (Employee Net Promoter Score- e NPS- un indicador que mide la lealtad y satisfacción de los empleados de una empresa, basándose en la probabilidad de que la recomienden como lugar de trabajo, compromiso, eficiencia de los procesos).
- Corroborar la hipótesis "una mejor experiencia interna conduce a una mejor experiencia externa" a través de un estudio piloto.

## 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1. Ingeniería de la Experiencia

La IE propone un enfoque novedoso para analizar y administrar las experiencias de los clientes en un contexto en el que las emociones son fundamentales para la satisfacción y lealtad de los consumidores hacia una empresa.

Se define como la disciplina que utiliza métodos ingenieriles en el diseño y evaluación de las experiencias entre el cliente y la empresa. Sus fundamentos incluyen: análisis de usuario, segmentación emocional, diseño de interacciones, integración de procesos, indicadores duales (funcionales y emocionales) y mejora continua. A diferencia de la gestión de la experiencia del cliente *Customer Experience Management* -CEM-, la IE emplea herramientas propias de la ingeniería industrial, tales como control estadístico, modelos de optimización y reingeniería de procesos.

La IE tiene origen en el concepto de Economía de Experiencias, que en la empresa contemporánea abarca varios elementos clave esenciales para la creación de valor y la satisfacción del cliente.

Un concepto relevante dentro de esta teoría es el compromiso emocional, que actúa como la base de la economía de experiencias, estableciendo la conexión entre la experiencia y la emoción. Las empresas deben enfocarse en generar experiencias emocionales que impacten positivamente a los clientes, dado que un compromiso emocional favorable puede resultar en una mayor lealtad y satisfacción del cliente.

Este enfoque se centra en el cliente, lo que implica una comprensión profunda de sus expectativas implícitas y ofrecer experiencias que trasciendan las simples transacciones, mejorando de este modo el recorrido integral del cliente.

La intención es destacar a través de experiencias únicas, sin depender únicamente del valor o calidad del producto ofrecido, que son variables ya establecidas, ni del servicio que no se distingue de los competidores. Por lo tanto, la diferenciación se produce a partir de experiencias memorables y singulares que los separen de sus competidores. Esto requiere un conocimiento profundo de las motivaciones de los clientes, lo que facilita la creación de experiencias personalizadas que satisfagan necesidades específicas.

A medida que las expectativas de los clientes evolucionan, las empresas deben innovar de manera constante en su oferta de servicios. Este proceso incluye la incorporación de nuevas tecnologías y metodologías que optimicen los aspectos experienciales de sus productos y servicios, asegurando así su relevancia en un mercado caracterizado por rápidas transformaciones.

El diseño de experiencias debe ser integral, abarcando múltiples puntos de contacto a lo largo del recorrido del cliente. Esto implica considerar no solo el producto o servicio en sí, sino también el contexto en el que se ofrece, las interacciones con el personal y la atmósfera general. Asimismo, es crucial que las experiencias se enfoquen no únicamente en el cliente, sino también en el recurso humano de la empresa.

La transición hacia una economía de experiencias está dando lugar a la creación de un nuevo marco ético en las prácticas empresariales. Se incentiva a las organizaciones a priorizar el bienestar y la satisfacción del cliente como parte de sus valores fundamentales, lo cual puede conducir a prácticas empresariales más sostenibles.

La IE es una disciplina que permite adoptar un enfoque sistemático hacia la economía de la experiencia. A diferencia de un diseño de servicio intuitivo, que depende de la creatividad individual o de percepciones subjetivas, la IE aplica metodologías rigurosas para analizar, diseñar e implementar interacciones que generen un valor emocional cuantificable (Grötsch, 2018). Esto se realiza a través de ciclos de mejora iterativos, ajustando procesos y experiencias basados en datos y retroalimentación real.

En contextos industriales, la IE posibilita la transformación de interacciones como la entrega, instalación, soporte técnico o capacitación en experiencias distintivas, lo que genera confianza, seguridad y lealtad. Esto influye directamente en las decisiones de recompra, reduciendo riesgos percibidos y costos ocultos para los clientes empresariales (B2B).

Goleman (1996) popularizó la noción de que la inteligencia emocional es un predictor más significativo de éxito que el coeficiente intelectual. Dentro del marco de este trabajo, la IE se considera una competencia de liderazgo esencial, no solo para la gestión interna de equipos, sino también para la interacción con los clientes. Un líder emocionalmente inteligente puede captar las necesidades no expresadas de los clientes y guiar a su equipo para que responda de manera empática y eficaz, convirtiendo una simple transacción en una relación de confianza.

Deming (1986) y Juran (1992) evidencian que la calidad y la eficiencia se logran a través de ciclos sistemáticos de planificación, medición y optimización. Las metodologías Lean y Six Sigma reafirman la importancia de integrar datos cuantitativos en la toma de decisiones, complementando la dimensión emocional de la IE.

La gestión de la calidad, teniendo a pioneros como Deming (1986) y Juran (1992), establece la base para la consistencia y fiabilidad. La mejora continua (Kaizen) asegura que los procesos sean sólidos. En el contexto de la IE, estos principios son fundamentales para garantizar que la experiencia prometida al cliente se cumpla de manera consistente en cada punto de contacto, y que cualquier "fricción" identificada en la fase de mapeo emocional pueda ser eliminada de manera sistemática.

La IE integra herramientas de diseño centrado en el usuario, análisis y gestión de procesos para alinear expectativas y emociones con los objetivos estratégicos de la organización. Su premisa fundamental es que la experiencia, tanto de clientes como de empleados, debe ser diseñada como un sistema que sea medible, repetible y escalable (Pine y Gilmore, 1998; Meyer y Schwager, 2007).

### 3.2. Pilares de la Ingeniería de la experiencia

Análisis profundo del usuario y su contexto: Comprensión de necesidades funcionales y emocionales mediante investigación cualitativa (entrevistas, *focus groups*, mapeo emocional) y cuantitativa (encuestas, escalas de satisfacción, NPS, *Customer Engagement Center* -CES-).

Diseño de interacciones orientadas a generar impacto emocional positivo: Arquitectura de experiencias que define secuencias de interacción (“*journeys”*) desde el primer contacto hasta la postventa, integrando procesos y personas para asegurar consistencia y empatía.

Implementación, medición y mejora continua: Indicadores duales: métricas funcionales (tiempo de respuesta, defectos, entregas a tiempo) e indicadores emocionales (NPS, satisfacción, confianza percibida), con ciclos iterativos de optimización.

### 3.3. Economía de la Experiencia

Estudios recientes enfatizan la importancia económica de la experiencia del cliente. McKinsey (2022) resalta que las organizaciones que mejoran su experiencia pueden disminuir la tasa de abandono de clientes entre un 10 % y 15 %, aumentar la tasa de éxito de sus ofertas entre un 20 % y 40 %, y reducir los costos operativos hasta un 50 %. Además, señala que la optimización de la experiencia está asociada con un incremento en los ingresos de entre un 2 % y un 7 %, un aumento en la rentabilidad que oscila entre el 1 % y el 2 %, y un retorno total para los accionistas de entre el 7 % y el 10 % (McKinsey, 2022a; McKinsey, 2022b).

De igual manera, Qualtrics (2023) demuestra que las organizaciones enfocadas en la experiencia obtienen un crecimiento 1.5 veces superior en términos de retención de clientes, tasa de recompra y valor del cliente a lo largo de su vida. Además, advierte que las experiencias negativas provocan pérdidas potenciales que ascienden a trillones de dólares en ventas a nivel global (Qualtrics, 2023).

Estos hallazgos respaldan la importancia estratégica de incorporar metodologías de experiencia del cliente tanto en el diseño externo (experiencia del cliente) como en los procesos internos (experiencia del empleado), siguiendo el marco del Service – Profit Chain (Heskett et al., 1994). Este modelo propone que la satisfacción del cliente es el resultado directo de una experiencia laboral positiva. Por ende, la IE interna debe concentrarse en tres elementos fundamentales:

• Cultura organizacional: fomento de la comunicación clara, empoderamiento y generación de confianza.

• Procesos internos eficientes: minimización de fricciones y aprovechamiento de la digitalización.

• Gestión del talento: capacitación continua, reconocimiento y liderazgo eficaz.

La fusión de estas dimensiones permite avanzar de un enfoque *outside - in* (centrado en el cliente) a uno *inside - out*, donde la propuesta de valor inicia con el empleado y se extiende al mercado. Las empresas que cultivan una cultura orientada hacia la experiencia logran una mayor resiliencia, innovación y diferenciación competitiva (McKinsey, 2022; Qualtrics, 2023).

## 4. MODELO DE INGENIERÍA DE LA EXPERIENCIA INDUSTRIAL (IEI)

Fase 1 – Investigación y Mapeo Emocional

El propósito de esta fase consiste en entender al cliente industrial no únicamente como una entidad racional en búsqueda de eficiencia, sino como un grupo de individuos dotados de emociones, frustraciones y expectativas.

- Identificación de puntos de contacto: Se lleva a cabo un mapeo de todos los momentos en los que el cliente se relaciona con la empresa, abarcando desde la primera consulta hasta el soporte posterior a

la venta. Las etapas incluyen la preventa, el diseño de soluciones, la entrega y el servicio posterior a la venta.

Entrevistas y encuestas: Se implementan enfoques cualitativos (entrevistas a clientes y usuarios técnicos) y cuantitativos (NPS, encuestas) para capturar tanto la narrativa de la experiencia como la percepción numérica. Este enfoque persigue identificar los "puntos de dolor" y las expectativas no manifestadas. Encuestas de satisfacción e indicadores NPS: Se emplean para medir la percepción.

- Mapeo de emociones: Se utiliza un mapa de la travesía del cliente con el objetivo de visualizar las emociones predominantes en cada punto de contacto, identificando los "puntos de dolor" que generan frustración, así como los "puntos de deleite" que podrían ser potenciados.

Se recurre a herramientas visuales como el *Customer Journey Map* (CJM) o Mapa del Viaje del Cliente que son aplicadas en marketing, diseño de servicios e IA para entender y representar gráficamente las interacciones que un cliente establece con una empresa a lo largo del tiempo. Su finalidad radica en capturar la experiencia del cliente desde su perspectiva, identificando cada punto de contacto *("touchpoint")* y las emociones o motivaciones asociadas a cada fase. El recorrido del cliente se segmenta en cinco etapas principales:

*Awareness* (Conciencia): La etapa inicial en la que el cliente potencial reconoce una necesidad o un problema y considera que su marca podría ser una solución viable.

*Interest* (Interés): En esta fase, el cliente comienza a investigar, comparar y buscar información adicional acerca de su producto o servicio.

*Purchase* (Compra): La fase en la cual el cliente hace una decisión y culmina la transacción.

*Retention* (Retención): Tras la compra, el enfoque se orienta a mantener la satisfacción y el compromiso del cliente para fomentar futuras adquisiciones.

*Advocacy* (Defensa/Abogacía): La fase final en la que el cliente se convierte en un promotor de la marca, recomendándola a otros.

En cada etapa, se enlistan los puntos de contacto correspondientes, que son los momentos de interacción con la empresa (por ejemplo, redes sociales, reseñas, el sitio web, el centro de atención telefónica, etc.).

Fase 2 – Diseño de la experiencia

Con una comprensión clara de los puntos de dolor, esta fase se enfoca en la reconfiguración de los procesos y la capacitación del personal con el propósito de crear experiencias más fluidas.

Co-creación: Colaborar con clientes clave para desarrollar soluciones a sus problemas conjuntamente, generando un sentido de pertenencia y validación.

Rediseño de procesos: Se utilizan herramientas de ingeniería como el mapeo de procesos para optimizar aquellos flujos de trabajo que generan fricciones, tales como las demoras en las cotizaciones.

Capacitación del personal: Se entrenan los equipos de ventas, técnicos y de logística no solo en habilidades técnicas, sino también en comunicación efectiva, escucha activa y empatía.

Fase 3- Ejecución

Implementación Metódica: Se llevan a cabo los diseños de experiencia, prestando atención a la alineación de la cultura organizacional y la capacitación del personal.

Medición y Evaluación Holística: Se aplican indicadores duales (funcionales y emocionales) para cuantificar el impacto. Esta medición ofrece retroalimentación esencial para la siguiente fase.

Fase 4 – Medición y Evaluación

La medición resulta crucial para la sostenibilidad del modelo. Se establecen indicadores claros que van más allá de la rentabilidad para incorporar la percepción y el esfuerzo del cliente.

Indicadores clave de rendimiento (-KPIs- *Key Performance Indicator*, que se traduce como Indicador Clave de Desempeño o Indicador Clave de Rendimiento):

*Net Promoter Score* (NPS): Evalúa la lealtad del cliente, utilizando métricas emocionales.

*Customer Effort Score* (CES): Valora la facilidad con la que el cliente puede resolver un problema o interactuar con la empresa.

Tasa de repetición de compras o valor de vida del cliente (*Lifetime Value* -LTV-): Un indicador financiero directo de la lealtad del cliente, que incluye métricas de negocio.

Tiempo promedio de resolución de quejas: Una métrica operativa que impacta directamente la experiencia, considerando el tiempo de respuesta a reclamaciones y la variabilidad en el tiempo de entrega.

Análisis estadístico trimestral: Este se destina a identificar tendencias y aislar el impacto de la IEI en relación con otras variables del mercado (cambios de precios, nuevos competidores, etc.) mediante análisis de regresión o comparación de cohortes.

Fase 5- Mejora continua

Talleres internos para ajustes iterativos: Implementando el ciclo *Plan-Do-Check-Act* -PDCA- correspondiente a la mejora continua. Se aplican ciclos como el PDCA para realizar ajustes iterativos basados en la información recopilada.

Dentro del ámbito de la IE, los talleres internos para ajustes iterativos constituyen una herramienta fundamental para asegurar que los procesos, servicios o productos evolucionen de manera continua hacia la excelencia en la experiencia del cliente. Estas reuniones se caracterizan por fomentar la colaboración interdisciplinaria, donde los equipos internos analizan datos, identifican áreas de mejora y sugieren modificaciones que son implementadas de forma controlada.

El ciclo PDCA es el marco metodológico más comúnmente aplicado en estos talleres. Su implementación se organiza de la siguiente forma:

Plan (Planificar): Se identifican problemas o áreas de mejora a partir de datos cuantitativos y cualitativos, como métricas de satisfacción del cliente, observaciones de campo, retroalimentación interna y resultados de pruebas piloto. Se diseñan acciones específicas para abordar estos problemas.

*Do* (Hacer): Se efectúan las acciones planificadas en un entorno controlado, garantizando que los cambios puedan ser evaluados y ajustados sin comprometer negativamente la operación general.

*Check* (Verificar): Se evalúan los resultados de la implementación, comparándolos con los objetivos establecidos. Se analizan indicadores clave, se recopila retroalimentación de los usuarios y se revisa la efectividad de las modificaciones.

*Act* (Actuar): Se consolidan los aprendizajes y se ajustan permanentemente los procesos, integrando las mejoras a los estándares operativos. Si los resultados no cumplen con las expectativas, se inicia un nuevo ciclo PDCA para continuar optimizando la experiencia.

El uso de estos talleres y del ciclo PDCA permite a las organizaciones industriales o de servicios transformar datos en conocimiento aplicable, promoviendo una cultura de mejora continua y asegurando que la experiencia del cliente progrese de manera consistente y medible. Además, fomenta la colaboración entre diversas áreas, el aprendizaje organizacional y la adaptación ágil ante cambios en el mercado o en las necesidades de los usuarios.

El ciclo no concluye con la implementación. Los datos y métricas retroalimentan la fase 1 de un nuevo ciclo. La "cultura de mejora continua" (Kaizen) de la IE se integra a la noción de que la innovación es un proceso interminable. Los resultados de la medición crítica desafían al equipo a "soñar" con soluciones cada vez más óptimas y a "prototipar" fundamentándose en la experiencia real.

## 5. CASO ADAPTADO

### 5.1. Acería METALSUR

METALSUR empresa fundada en 1998, cuya actividad principal es Fabricación de acero plano laminado y productos derivados para industrias automotriz, construcción y maquinaria pesada, ubicada en Buenos Aires, Argentina, con plantas en Rosario y Córdoba.

#### 5.1.1. Tamaño y estructura organizacional:

Empleados: 350 (150 en planta, 100 en logística y distribución, 50 en ventas y atención al cliente, 50 en administración y gestión).

Departamentos clave: Producción, Logística, Ventas, Ingeniería de Producto, Atención al Cliente, Calidad y Mantenimiento.

Alta dirección compuesta por CEO, Director de Operaciones, Director Comercial y Director de Calidad.

**5.1.2. Clientes principales:**

Constructoras de infraestructura urbana y civil.

Industrias automotrices nacionales y regionales.

Fabricantes de maquinaria industrial.

Distribuidores mayoristas de acero y metales.

Volumen de producción anual: 150.000 toneladas de acero laminado.

**5.1.3. Tecnología y procesos:**

Planta equipada con laminadores en caliente y frío, hornos de tratamiento térmico y líneas de control de calidad automatizadas.

Sistema ERP integrado que gestiona producción, logística y ventas, pero con limitado seguimiento de experiencias emocionales de clientes antes de la implementación del modelo IEI.

**5.1.4. Valores y cultura organizacional:**

Orientación a la calidad y seguridad industrial.

Tradición en cumplimiento de contratos, con fuerte enfoque en confiabilidad técnica.

Cultura interna jerárquica, con oportunidades de mejora en comunicación interdepartamental y atención proactiva al cliente.

**5.1.5. Desafíos previos al caso piloto:**

*Churn* anual -tasa de abandono o pérdida de cliente- de 12% en clientes industriales.

NPS de +32 puntos, reflejando percepción insuficiente en atención y seguimiento de pedidos.

Tiempos de respuesta a incidencias de hasta 72 horas.

Falta de estandarización en comunicación entre ventas, planta y logística.

**5.1.6. Oportunidades identificadas**:

Integrar métricas emocionales y operativas para mejorar la satisfacción del cliente.

Digitalizar y estandarizar procesos de seguimiento de pedidos y atención postventa.

Capacitar al personal en atención proactiva y comunicación empática.

Transformar los procesos industriales y de soporte en experiencias diferenciadoras para clientes B2B.

**5.1.7 Implementación del modelo IEI**

Fase 1 – Investigación y Mapeo Emocional

Se identificaron 14 puntos de contacto críticos en la relación cliente-empresa a lo largo del ciclo: preventa, cotización, pedido, producción, entrega, postventa y soporte técnico.

Las encuestas EVI realizadas a 120 clientes clave, junto con entrevistas y grupos focales, revelaron emociones negativas asociadas con demoras, incertidumbre y escasa visibilidad respecto al estado de los pedidos.

El análisis de los procesos internos puso de manifiesto cuellos de botella en logística y comunicación entre departamentos.

El equipo multidisciplinario de MetalSur, compuesto por ingenieros, personal de ventas y atención al cliente, inició la transformación mediante un taller de *Imagineering*, focalizándose en el dolor recurrente: la complejidad en el seguimiento de pedidos de productos personalizados.

Subfase 1.1: - Mapeo Emocional Radical

El equipo liberó las limitaciones técnicas y operativas, concentrándose en la pregunta: “¿Cómo podría ser la experiencia del cliente si la adquisición de acero fuese tan sencilla y transparente como rastrear un paquete de Amazon?”

Las ideas surgidas durante la lluvia de ideas incluyeron:

Un portal web que no solo mostrara el estado del pedido, sino que también permitiera al cliente ver imágenes en tiempo real de su producto en las diversas fases de producción.

Una aplicación móvil capaz de enviar notificaciones proactivas sobre cada avance (corte, tratamiento, empaquetado) utilizando un tono de comunicación personal y entusiasta.

La creación de un “gestor de experiencia” que funcionara como único punto de contacto, responsable de toda la información y capaz de resolver cualquier duda de forma inmediata.

El objetivo no era únicamente informar, sino también generar una sensación de seguridad, control y emoción en un proceso que tradicionalmente es frío y técnico.

Subfase 1.2: - Diseño con Propósito

Las ideas generadas por el Soñador se filtraron para evaluar su viabilidad. El equipo determinó que el portal web para el seguimiento del estado era factible, al igual que las notificaciones móviles. El “gestor de experiencia” fue rediseñado como una función dentro del equipo de ventas, asignando a un individuo específico por cada cliente clave. Se trazó el flujo de información: cómo se captarían los datos de producción y se presentarían de manera simplificada en el portal. El equipo mapeó los procesos de producción y logística para identificar puntos de datos clave (ingreso de materia prima, inicio de corte, control de calidad, carga en transporte) y vincularlos al flujo de la nueva experiencia.

Subfase 1.3: - Identificación de Riesgos y Puntos de Fricción

Durante esta fase, el equipo examinó las debilidades del diseño propuesto. Las principales preocupaciones incluyeron:

Riesgo de sobre - promesa: ¿Qué sucedería si el portal indicara un retraso inesperado? La transparencia podría provocar frustración. La solución fue establecer un canal de comunicación proactiva que permitiera al gestor de experiencia contactar al cliente antes de que este observase el retraso.

Fricción durante la implementación: El nuevo portal requeriría una inversión significativa y modificaciones en los sistemas de gestión de producción. Se decidió desarrollar un prototipo mínimo viable *Minimum Viable Product* -MVP- Producto Mínimo Viable, que es una versión simplificada de un producto con solo sus características esenciales para un grupo selecto de clientes, con funcionalidades limitadas para probar el concepto antes de realizar una inversión a gran escala.

Este proceso transformó la “fase de investigación” en un ejercicio de co - creación, lo que permitió a MetalSur no solo abordar un problema informativo, sino diseñar una experiencia que generó un valor emocional superior al de la competencia. Las mejoras posteriores, evaluadas en las fases de Medición y Evaluación, validaron el éxito de esta metodología.

Fase 2 – Diseño de la experiencia

Se rediseñó el proceso de confirmación de pedidos, reduciendo el tiempo de respuesta de 72 horas a 24 horas mediante la integración digital entre ventas, planta y logística.

Se asignó un gestor de cuentas estratégicas para clientes clave, encargado de la comunicación proactiva y la rápida resolución de incidencias.

Se creó un portal digital para el seguimiento de pedidos con alertas automáticas y visualización del estado en tiempo real.

Se establecieron protocolos estandarizados de comunicación y escalamiento para incidentes críticos.

Fase 3- Ejecución

Se capacitó a 25 empleados de logística y planta en atención al cliente, manejo de incidencias y comunicación empática.

Se implementó un plan piloto de interacción emocional, en el cual cada punto de contacto fue diseñado para generar confianza y seguridad.

Se integraron equipos multidisciplinarios para garantizar la consistencia entre procesos, tecnología y atención personalizada.

Fase 4 – Medición y Evaluación

Se diseñó un *dashboard* o cuadro de mando integral con KPIs operativos (tiempo de resolución de incidencias, entregas puntuales, retrabajos) y KPIs emocionales (EVI, NPS, satisfacción post entrega).

Se llevaron a cabo revisiones mensuales y reportes trimestrales, identificando tendencias, riesgos y oportunidades de mejora.

Fase 5 – Mejora Continua

Se establecieron ciclos trimestrales de ajuste en logística, comunicación y soporte técnico basados en datos y retroalimentación directa de los clientes. Se incorporaron lecciones aprendidas en los protocolos y capacitaciones, fomentando una cultura de mejora continua.

Aplicación del ciclo PDCA en MetalSur

Dentro del contexto de la implementación del modelo IEI en MetalSur, los talleres internos para ajustes iterativos se convirtieron en un elemento fundamental para asegurar la mejora continua en la relación con los clientes B2B y la optimización de los procesos internos. Estos talleres se organizaron como espacios de trabajo colaborativos, donde equipos multidisciplinarios, integrados por personal de ingeniería, ventas, logística, atención al cliente y calidad, examinaron los resultados de las fases piloto y propusieron ajustes fundamentados en datos tanto cuantitativos como cualitativos.

La metodología adoptada se basó en el ciclo PDCA, estructurando los talleres de la siguiente manera:

Plan (Planificar): A partir de los hallazgos obtenidos en la Fase 1 – Investigación y Mapeo Emocional, se identificaron los principales puntos de fricción, tales como la complejidad en el seguimiento de los pedidos personalizados, los retrasos en la comunicación interdepartamental y la percepción de incertidumbre por parte de los clientes. El equipo diseñó acciones específicas para abordar estas áreas críticas, incluyendo el desarrollo de un portal digital para el seguimiento de pedidos, notificaciones móviles proactivas y la asignación de gestores de experiencia por cada cliente clave.

Hacer (Hacer): Se implementaron prototipos de estas soluciones (MVP) con un grupo selecto de clientes, lo que permitió probar la funcionalidad del portal, las notificaciones y el rol del gestor de experiencia. Al mismo tiempo, se capacitó a 25 empleados de logística y planta en comunicación empática y resolución rápida de incidencias, asegurando que la experiencia del cliente se mantuviera coherente en todos los puntos de contacto.

Verificar (Verificar): Se evaluaron los resultados a través de KPIs operativos y emocionales, que incluyeron tiempo medio de resolución de incidencias, cumplimiento de entrega, NPS y EVI. La revisión mensual de estos indicadores posibilitó identificar tendencias, validar la efectividad de las acciones implementadas y detectar posibles desviaciones respecto a los objetivos establecidos.

Actuar (Actuar): Los aprendizajes obtenidos en la fase de verificación se incorporaron en protocolos estandarizados, flujos de información y capacitación interna. Los ciclos trimestrales de ajustes permitieron perfeccionar los procesos de logística, comunicación y soporte técnico, consolidando una cultura de mejora continua que reforzó tanto la satisfacción del cliente como el compromiso y la participación de los empleados.

La integración del PDCA en los talleres internos permitió a MetalSur no solo reaccionar ante problemas detectados, sino anticiparse a posibles fricciones, transformando los procesos industriales tradicionalmente técnicos en experiencias diferenciadoras para el cliente. Como resultado, se observó una mejora notable en NPS (+28 puntos), una reducción en el *churn* (-50%), una disminución en los tiempos de respuesta (-61%) y un fortalecimiento de la cultura interna, reflejado en e NPS (+33 puntos) y el *engagement* que significa el compromiso o involucramiento y se refiere al nivel de interacción, participación y conexión que una persona tiene con algo, como una marca, un trabajo o un contenido, (+16%).

Este enfoque demuestra que los talleres iterativos con PDCA constituyen una herramienta eficaz para convertir datos y observaciones en acciones concretas, promoviendo un ciclo de retroalimentación positiva que une la mejora operativa con la experiencia emocional del cliente.

### 5.1.8. Resultados cuantitativos

Los resultados cuantitativos fueron los siguientes presentados en la tabla 1 que se presenta a continuación:

Tabla 1 Resultados cuantitativos de la empresa antes y después de aplicar el modelo

| Indicadores externos | Antes | Después | Mejora |
|---|---|---|---|
| NPS | +10 | +38 | +28 puntos |
| EVI | 100 | 122 | +22% |
| Churn anual | 12% | 6% | -50% |
| Tiempo medio | 72 hs | 28 hs | +61% |
| Ventas recurrentes | 100% | 105% | +5% |
| Satisfacción post entrega | 65% | 88% | +23% |
| Retrabajo por error en logística | 7% | 2% | -71% |
| Cumplimiento de entrega a tiempo | 82% | 96% | +14% |
| Indicadores internos | | | |
| E NPS | +12 | +45 | +33 |
| Engagement | 58% | 74% | +16% |
| Tasa de rotación anual | 18% | 11% | -39% |
| Tiempo de autorización logística | 48 hs | 12hs | -75% |

El indicador NPS fue evaluado a través de una encuesta estructurada administrada a 120 clientes clave. Los clientes contestaron a la pregunta: "¿Qué tan probable es que recomiende a MetalSur a un colega o socio?" utilizando una escala que va del 0 al 10. El puntaje NPS se determinó sustrayendo el porcentaje de detractores (calificaciones de 0 a 6) del porcentaje de promotores (calificaciones de 9 a 10). La mejora observada indica un aumento significativo en la predisposición de los clientes a recomendar la empresa, atribuible a las mejoras en la comunicación, los tiempos de entrega y el soporte.

Para el EVI, se implementó la metodología de EVI (Sánchez, 2020), que consistió en una combinación de encuestas de satisfacción con el mapeo emocional en puntos críticos de contacto. Cada interacción fue evaluada en función de las emociones positivas, neutras y negativas que el cliente percibió. La mejora sugiere que la percepción emocional de los clientes se fortaleció como resultado del rediseño de los procesos y la capacitación del personal.

El *churn,* que se refiere a la tasa de cancelación o pérdida de clientes, se calcula como el porcentaje de clientes que dejan de adquirir productos o no renuevan sus contratos. Este indicador se estableció comparando el número de clientes recurrentes de un año a otro, utilizando datos extraídos del *Customer Relationship Management* o Gestión de Relaciones con el Cliente -CRM- interno y de los registros de contratos. La reducción en este porcentaje refleja un mayor nivel de fidelización que resulta de las experiencias mejoradas y del seguimiento proactivo.

El tiempo medio se evaluó a través del sistema interno de tickets de soporte, registrando las fechas y horas de apertura y cierre de cada incidencia. La disminución en este tiempo indica que la estandarización de protocolos y la capacitación del personal permitieron una atención más ágil y una resolución más rápida de los problemas.

Las ventas fueron analizadas mediante datos disponibles en el ERP interno, comparando el volumen de pedidos de los clientes existentes antes y después de la implementación del modelo IEI. El incremento registrado sugiere que la mejora de la experiencia del cliente ha generado confianza y propensión a continuar comprando, lo que afecta directamente los ingresos.

Se llevaron a cabo encuestas de satisfacción que se aplicaron tras la entrega del pedido, evaluando la percepción de puntualidad, comunicación y calidad del producto. La mejora observada refleja la efectividad de los protocolos de comunicación proactiva y de la gestión de expectativas del cliente.

Se registraron en el sistema ERP aquellos pedidos que requirieron ajustes, correcciones o devoluciones debido a errores logísticos. La disminución en la cantidad de estos pedidos indica una optimización de los procesos, una mejor planificación de inventarios y un seguimiento proactivo de la cadena de suministro.

Los datos relacionados con el cumplimiento de la entrega a tiempo se obtuvieron del sistema de planificación de producción y logística. Se midió el porcentaje de pedidos entregados dentro del plazo establecido. La mejora en este indicador refleja una mayor eficiencia en la coordinación interna, así como una reducción de los retrasos y una comunicación anticipada con los clientes.

E NPS (+33 puntos): esto indica un incremento notable, sugiriendo que los empleados se sienten más orgullosos y dispuestos a recomendar la empresa.

Engagement (+16%): un mayor compromiso laboral se traduce en un aumento en la productividad y una disminución en el ausentismo.

Rotación (-39%): esta disminución tiene un impacto directo en los costos (menos gastos en reclutamiento y capacitación) y en la retención del conocimiento.

Tiempo de autorización (-75%): el rediseño digital y la cooperación entre áreas han reducido las fricciones internas, agilizando así toda la cadena de trabajo.

**5.1.10. Metodología de obtención de resultados**:

Fuentes de datos: CRM y ERP para métricas operativas, encuestas estructuradas (NPS, EVI) para métricas emocionales, entrevistas y *focus groups* para validación cualitativa.

Herramientas: *dashboards* integrados que combinan KPIs operativos y emocionales para seguimiento en tiempo real y análisis de tendencias.

Determinación: comparación entre indicadores antes y después de implementar el modelo IEI, aplicando análisis cuantitativo y cualitativo, con ciclos iterativos de mejora continua.

El caso piloto evidencia que la IE aplicada al sector industrial genera resultados tangibles:

- La combinación de métricas emocionales y operativas permite decisiones más informadas y estratégicas.
- La integración de procesos, tecnología y personas es clave para convertir interacciones rutinarias en experiencias diferenciadoras.
- La mejora continua asegura que los avances no sean puntuales, sino sostenibles en el tiempo.

MetalSur demuestra que la IE no es exclusiva de servicios o entornos *Business to Consumer* o empresa a consumidor -B2C-, sino que puede transformar la relación con clientes industriales, optimizando la percepción emocional, la eficiencia operativa y la fidelización.

Si bien se reconoce la dificultad de aislar por completo el efecto de todas las variables externas, la magnitud de la mejora en indicadores emocionales (NPS, EVI) y la consistencia de los resultados cualitativos sugieren una fuerte causalidad derivada de la implementación del modelo IEI.

Para Experiencia Interna (Empleado y Procesos) se utilizaron las siguientes herramientas:

NPS (Employee Net Promoter Score): mide la disposición de los empleados a recomendar MetalSur como lugar de trabajo.

Encuestas de Engagement: modelo Gallup Q12 adaptado, evaluando motivación, liderazgo y clima laboral.

*Value Stream Mapping* (Lean): identificación de cuellos de botella en logística y autorizaciones.

Plataforma de Feedback y Reconocimiento: herramienta "Software as a Service", Software como Servicio -SaaS (Worky)- plataforma específicamente enfocada en la gestión de recursos humanos y nómina para empresas, que permite automatizar y centralizar estas tareas desde cualquier dispositivo conectado a internet.

Sistema ERP + Panel Colaborativo: integración con SAP para digitalizar procesos internos, visibilidad de stock y autorizaciones.

Capacitación en Metodologías Ágiles: workshops presenciales orientados a mandos medios para liderar equipos autogestionados.

## 6. CONCLUSIÓN

La aplicación de la IE en contextos industriales, como en el caso de MetalSur, evidencia que la gestión enfocada en experiencias no se limita a la industria de servicios ni a las empresas B2C. De hecho, su adopción estratégica facilita la optimización simultánea de la percepción del cliente y la eficacia interna, dos aspectos que tradicionalmente se han abordado de manera aislada.

Los resultados demuestran que, al combinar metodologías centradas en el usuario (NPS, EVI, mapeo de *journeys*) con herramientas para la mejora de procesos (Lean, ERP, retroalimentación interna), la organización obtiene beneficios cuantificables:

- Disminución del churn en un 50%.
- Aumento del engagement interno en 16 puntos porcentuales.
- Reducción del tiempo de respuesta al cliente en más del 60%.
- Incremento del e NPS y disminución de la rotación de personal.

Estos indicadores subrayan un principio esencial: una organización con procesos internos robustos y una cultura organizacional enfocada en la experiencia es más competitiva, rentable y resiliente. La eficiencia debe concebirse no como un objetivo aislado, sino como un medio para crear valor emocional, confianza y relaciones sostenibles.

Desde una perspectiva estratégica, la IE se establece como una disciplina híbrida que combina psicología, diseño, ingeniería de procesos y análisis de datos. Su potencial trasciende la optimización operativa: permite destacar en mercados cada vez más comoditizado, donde la calidad técnica por sí sola ya no es suficiente y la percepción de valor determina la decisión del cliente.

En conclusión, este enfoque promueve un modelo organizacional más humano, ágil y adaptable, donde la experiencia no se limita a la interacción final con el cliente, sino que se construye desde el interior, alineando personas, procesos y tecnología. En el ámbito industrial, esto representa una ventaja competitiva sostenible, fundamentada en la innovación continua y la coherencia entre lo que la empresa promete y lo que efectivamente ofrece.

## 7. REFERENCIAS


Deming, W. E. (1986). Out of the crisis. MIT Press.

Goleman, D. (1996). Emotional intelligence: Why it can matter more than IQ. Bantam Books.

Grötsch, K. (2018). Ingeniería de la experiencia: Cómo diseñar experiencias memorables y medibles. Springer.

Heskett, J. L., Sasser, W. E., & Schlesinger, L. A. (1994). The service profit chain: How leading companies link profit and growth to loyalty, satisfaction, and value. Free Press.

Juran, J. M. (1992). Juran on quality by design: The new steps for planning quality into goods and services. Free Press.

McKinsey & Company. (2022a). Finding the right digital balance in B2B customer experience. Retrieved from https://www.mckinsey.com/business-functions/marketing-and-sales/our-insights/finding-the-right-digital-balance-in-b2b-customer-experience

McKinsey & Company. (2022b). Prediction: The future of Customer Experience. Retrieved from https://www.mckinsey.com.br/en/tr/our-insights/prediction-the-future-of-customer-experience

Qualtrics XM Institute. (2023). Customer experience statistics. Retrieved from https://www.qualtrics.com/blog/customer-experience-stats/

Pine, B. J., & Gilmore, J. H. (1999). The experience economy: Work is theatre & every business a stage. Harvard Business School Press.

Sánchez, M. (2020). Emotional Value Index: Una metodología para medir experiencias de cliente. Editorial Gestión y Empresa.

# GESTIÓN POR PROCESOS Y HERRAMIENTAS ÁGILES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE NUEVAS LÍNEAS DE NEGOCIO EN UNA PYME

Hetze, Vanesa; Gallegos, Ma. Laura; Conti, Nazarena

*Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional.*

*vhetze@frsn.utn.edu.ar, mgallegos@frsn.utn.edu.ar, nconti@frsn.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

Este trabajo presenta una experiencia de mejora continua en una PYME de servicios, a partir de la detección de una oportunidad estratégica de crecimiento. Mediante un análisis de contexto basado en la herramienta FODA, la empresa identificó fortalezas internas y condiciones del entorno que posibilitaron el desarrollo de una nuevas líneas y estrategias de negocio.

A partir de esta oportunidad, se aplicó un enfoque de gestión por procesos con apoyo en metodologías ágiles, priorizando la planificación visual, la colaboración entre áreas y la rápida implementación. Se utilizó una herramienta de gestión de proyectos para organizar tareas, etapas clave del proceso y responsables, facilitando la comunicación y la adaptabilidad ante cambios.

Este caso demuestra cómo una PYME pueden articular análisis estratégico, procesos clave y herramientas digitales simples para impulsar mejoras concretas en sus servicios, sin necesidad de grandes estructuras. Se pone en valor la combinación de la planificación estratégica, la mejora continua y la agilidad operativa como pilares de la sostenibilidad en contextos dinámicos y competitivos.

**Palabras Claves:** Gestión por Procesos, Herramientas ágiles, Pymes.

**ABSTRACT**

This paper presents an experience of continuous improvement in a service-based SME, stemming from the identification of a strategic growth opportunity. Through a contextual analysis using the SWOT tool, the company identified internal strengths and external conditions that enabled the development of a new business line.

Based on this opportunity, a process management approach was applied, supported by agile methodologies that prioritized visual planning, cross-functional collaboration, and rapid implementation. A project management tool was used to organize tasks, key process stages, and responsibilities, facilitating communication and adaptability to change.

This case demonstrates how SMEs can integrate strategic analysis, key processes, and simple digital tools to drive tangible improvements in their services without requiring large organizational structures. It highlights the value of combining strategic planning, continuous improvement, and operational agility as pillars of sustainability in dynamic and competitive environments.

**Keywords:** *Process Management*, *Agile Tools, SMEs*

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En un contexto empresarial caracterizado por la alta competitividad y la rápida evolución del mercado, las pequeñas y medianas empresas (PYME) enfrentan el desafío de adaptarse y renovarse constantemente para mantener su relevancia y competitividad. En este sentido, la detección y el aprovechamiento de oportunidades estratégicas se convierten en elementos clave para potenciar su desarrollo y sostenibilidad.

Para abordar el diagnóstico, se llevó a cabo un análisis exhaustivo del contexto interno y externo mediante la aplicación de la herramienta FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas), de modo de interpretar escenarios y detectar estrategias de acción. El análisis FODA permitió identificar tanto las capacidades internas de la empresa, como las condiciones externas asociadas al entorno, facilitando el diseño de una nueva línea de negocio acorde con los recursos y potencialidades disponibles.

Con el objetivo de maximizar el impacto de esta iniciativa, se adoptó un enfoque de gestión basado en procesos, complementado con metodologías ágiles que permitieron priorizar la planificación visual, fomentar la colaboración interdepartamental y acelerar la implementación de cambios. La integración de una herramienta digital de gestión de proyectos resultó fundamental para organizar y monitorear tareas, definir etapas críticas del proceso y asignar responsables, asegurando una comunicación fluida y una capacidad de adaptación efectiva ante eventuales modificaciones del entorno o necesidades del negocio.

Este caso, ilustra cómo una PYME puede consolidar de manera exitosa el análisis estratégico, la sistematización de procesos clave y el uso de herramientas digitales simples para impulsar mejoras concretas en sus servicios, sin requerir grandes estructuras o inversiones complejas. Se destaca, la importancia de articular elementos de planificación estratégica, mejora continua y agilidad operativa como pilares fundamentales para la sostenibilidad y crecimiento en ambientes empresariales dinámicos y altamente competitivos. Esta experiencia aporta evidencia práctica y reflexiones valiosas para otras pequeñas y medianas empresas que busquen consolidar su desarrollo a través de la innovación y la gestión eficiente.

La metodología utilizada es descriptiva bajo la modalidad de estudio de caso, dado que se analiza en profundidad la experiencia de una PYME de servicios al implementar metodologías ágiles y gestión por procesos. Se complementó con la investigación-acción, focalizando en resolver un problema práctico y en simultáneo, generar conocimiento para su transferencia a contextos de similar alcance.

Este trabajo describe una experiencia de mejora continua en una PYME del sector servicios, que surge a partir de la identificación de una oportunidad estratégica de crecimiento.

## 2. MARCO TEÓRICO

Porter define estrategia como la creación de una posición valiosa y única que involucra un conjunto de diferentes actividades (Porter, 1996). De acuerdo con Arciénaga Morales et al (2024), quienes citan diferentes estudios como los realizados por Boyne y Walker ( 2010), Whittington et al (2011), enfatizan en el papel de la estrategia a la hora de establecer la dirección, centrar el esfuerzo colectivo y garantizar la coherencia en las acciones gerenciales en toda una organización. En la actualidad, la estrategia no se concibe como una respuesta pasiva a las condiciones del mercado, sino como un proceso dinámico de interacción en un entorno cambiante, en el cual la organización despliega su capacidad de adaptación e innovación.

En numerosas oportunidades, los resultados empresariales dependen de la capacidad de respuesta de la organización, su capacidad de acción y de toma de decisiones (Arciénaga Morales et al, 2024). Este análisis, da lugar al concepto de estrategia coyuntural, que presupone concebir la relación entre la empresa y su entorno sin perder de vista la realidad cambiante de los mercados y un proceso introspectivo para comprender sus procesos y capacidades. Varios factores son los que influyen en el fortalecimiento del proceso de toma de decisiones, entre ellos, el diseño organizacional, cuestiones ambientales y el contexto histórico en el que se toman las decisiones (Evanthi, 2021). Para ello, Arciénaga Morales et al (2024), proponen utilizar instrumentos de análisis y herramientas de planificación estratégica para relevar cuestiones internas y del entorno.

El análisis FODA plantea que las organizaciones poseen factores internos, denominados fortalezas y debilidades, que son intrínsecos a sus operaciones. Las fortalezas son atributos o capacidades que brindan una ventaja competitiva y las debilidades son limitaciones o deficiencias que obstaculizan el

desempeño organizacional (Gürel, 2017; Ke, 2009; Arciénaga Morales, 2024). Según la matriz FODA, la empresa puede alinear sus actividades y capacidades internas con las realidades externas de su entorno de competencia. De acuerdo con Arciénaga Morales et al (2024), particularmente el análisis externo, propicia la oportunidad de no perder el foco en el mercado o segmento en el cual actúa e interactúa con otros competidores y con sus clientes reales. La aplicación de la matriz en una organización tiene por objetivo ofrecer un claro diagnóstico de los escenarios posibles para la toma de decisiones estratégicas y oportunas en camino de mejorar su futuro.

En cuando a la mirada interna, el análisis de los procesos constituye una herramienta necesaria para fortalecer un diagnóstico. La Norma IRAM ISO 9001:2015, pone de relieve en su Introducción, al describir sus Principios de Calidad, el denominado Enfoque de Procesos, haciendo referencia a que, para que una organización funcione de manera eficaz, debe identificar y gestionar eficientemente numerosas actividades relacionadas e interconectadas entre sí. Una actividad que utiliza recursos y que se gestiona con el fin de transformar elementos de entradas en resultados, se denomina “proceso”. La identificación de las distintas interacciones de cada uno de esos procesos, así como su gestión, puede denominarse como "enfoque basado en procesos”.

En el caso de las PYMES, la gestión por procesos resulta crítica, ya que posibilita profesionalizar la estructura organizativa, reducir costos ocultos y aumentar la flexibilidad frente a cambios en el mercado. (Dumas et al, 2018)

Ortíz-Fernandez et al (2024), exploran la literatura actual sobre la gestión por procesos, centrándose en su aplicación en las empresas y mencionan a Florián et al (2022), quienes definen la gestión por procesos como el método empleado para la administración de los procesos empresariales, con la finalidad de ajustarlos a la misión, objetivos y estrategias de la organización, siempre con un enfoque centrado en la satisfacción del cliente (basado en la capacidad de adaptación y la generación de valor). Señalan, además, que garantiza la flexibilidad y la agilidad en los procesos mediante la reestructuración de los flujos de trabajo.

Ante la necesidad constante de adaptación a los cambios y de respuesta, la adopción de metodologías ágiles constituye un respaldo efectivo para el seguimiento de proyectos. Las metodologías ágiles tuvieron su origen principalmente en el ámbito del desarrollo de software, cuando surgen formalmente en 2001 con el Manifiesto Ágil (Beck et al, 2001), han evolucionado hacia un marco de trabajo más amplio con el transcurso de los años, como gestión de operaciones, marketing, entre otros.

Calero Santillán y Villavicencio (2024) señalan citando a Rivero (2019), dos cuestiones importantes referidas a las metodologías ágiles: por un lado, que la gestión del conocimiento puede aplicarse en el desarrollo de proyectos, implicando el trabajo colaborativo, intercambio de conocimientos y la adopción de nuevos estilos de liderazgo, por otro, que es relevante contar con un Modelo de Gestión de Conocimiento con enfoque Ágil. Este modelo, dirigido por un proceso iterativo, potencia las habilidades de los colaboradores con el fin de mejorar la producción dentro de la empresa. En su estudio, describen una herramienta destinada a impulsar eficiencia, calidad y productividad, conocida como Trello que, en ocasiones, utiliza la implementación de un tablero, que puede representarse en forma de diagrama de flujo para visualizar claramente el proceso del proyecto y que se configura como un modelo que busca abordar ciertos inconvenientes relacionados con la planificación a nivel estratégico.

Las preguntas que motivaron el desarrollo de este trabajo y a las cuales se busca dar repuesta son: ¿cómo aplican las PYMES metodologías ágiles en el marco del desarrollo de un proyecto? ¿Qué herramientas de diagnóstico utilizan principalmente para su implementación? ¿Cómo las llevan a cabo?

## 2. DESARROLLO

### 2.1 Contexto y caso de estudio

La empresa, objeto de estudio, es una PYME local dedicada principalmente al negocio de soldadura y corte, líder en la ciudad y con presencia la región. Sus principales clientes son empresas de montajes industriales, de mantenimiento y metalmecánicas. Ofrece un servicio integral que consiste en la venta de productos y el servicio posventa, y que incluye el asesoramiento previo y capacitación, seguimiento y aportes de valor que caracterizan su atención personalizada y con enfoque al cliente.

Además, y como actividad complementaria, comercializa gases industriales en envases presurizados para el sector metalmecánico y de mantenimiento. Esta actividad requiere una gestión eficiente de los cilindros, que deben someterse periódicamente a pruebas hidráulicas para garantizar la seguridad y la conformidad normativa.

En este contexto, y a partir de un análisis FODA realizado por un equipo multidisciplinario, se detectó una oportunidad de mejora, que se analizó desde el enfoque de procesos y del enfoque al cliente.

### 2.2 Detección de la oportunidad

Como primer paso, se llevó a cabo un análisis del contexto interno y externo mediante la aplicación de una matriz FODA. Para ello, se realizó un estudio y diagnóstico de la organización, que permitió el desarrollo de la matriz de la Figura 1, con la finalidad de proporcionar a la empresa una herramienta para la toma de decisiones estratégicas.

Este análisis permitió identificar diversas Fortalezas, Debilidades, Oportunidades y Amenazas que afectan en forma directa a la calidad y eficiencia del servicio brindado a los clientes, como así también a la rentabilidad de la empresa.

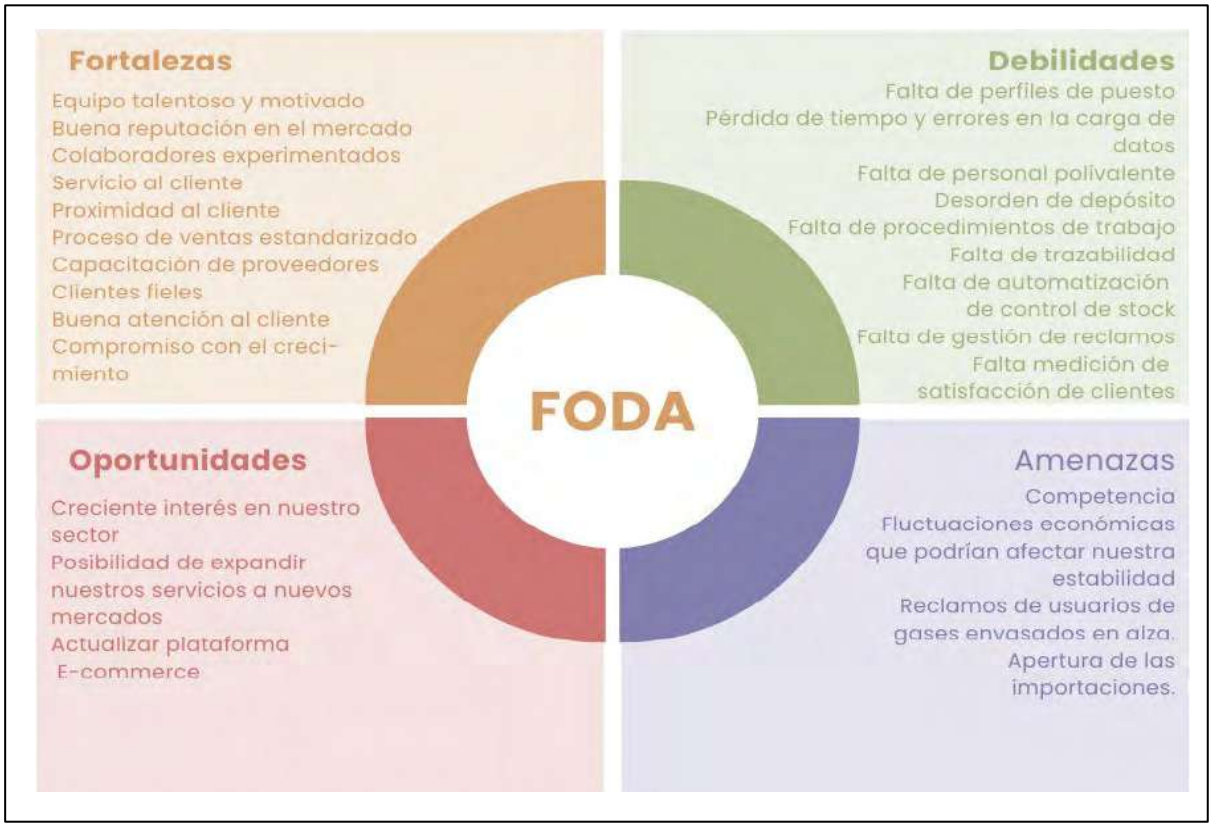



*Figura 1. FODA de la empresa. Elaboración propia*

Con base en el análisis realizado y a través de la técnica de *brainstorming*, se detectó una debilidad clave relacionada con la trazabilidad y gestión de envases. Los tubos utilizados para la venta de gases se prestaban sin fecha de devolución del tubo, lo que generaba inconvenientes con el seguimiento y la detección temprana del vencimiento de las pruebas hidráulicas. (Conti et al, 2025)

Luego, se realizó una matriz CAME (Corregir debilidades, Afrontar amenazas, Mantener fortalezas y Explorar oportunidades), que analiza el FODA para obtener estrategias a seguir, en este caso, se exploran oportunidades del contexto externo para corregir debilidades detectadas en el contexto interno.

De los resultados obtenidos, una de las estrategias resultantes fue la implementación de una gestión eficiente de envases, trazando un objetivo de incrementar la rotación de envases en un 50%, para aprovechar la oportunidad de expansión a nuevos mercados y aumentar la rentabilidad de la empresa.

### 2.2 Diseño del proceso y planificación ágil

Con el propósito de optimizar los resultados derivados del análisis FODA, se adoptó un enfoque de gestión orientado por procesos. La organización tiene procesos que interactúan para proporcionar resultados coherentes con los objetivos, y tienen actividades interrelacionadas con entradas que generan salidas (ISO, 2015). Entender cómo este sistema produce los resultados (salidas) permite a la organización optimizar el sistema y su desempeño.

Para ello, se diseñó el mapa de procesos de la empresa, Figura 2, identificando los procesos estratégicos, procesos clave (Figura 3) y procesos de soporte. Se investigó y entrevistó a los diferentes sectores, luego se sistematizó y mejoró el conjunto de las actividades claves vinculadas a la propuesta de valor de la empresa.

Se definió la secuencia del nuevo proceso, se realizaron capacitaciones al personal involucrado en la empresa y se diseñaron los mecanismos de comunicación y retroalimentación con los clientes implicados, permitiendo no solo ordenar la gestión de envases, sino optimizarla, mejorar la relación con los clientes, y obtener rentabilidad.

Para llevar adelante la propuesta, primero se desarrolló un plan de trabajo (Figura 4) con las actividades a realizar, plazos y responsables. Se planteó un escenario de tres meses de implementación, involucrando a seis áreas entre las que se pueden mencionar: Logística, Operaciones, Ventas, Tecnología de la Información, Finanzas y Recursos Humanos.

Dada la participación de varios sectores en simultáneo, se detectó la necesidad de una gestión de avance ágil, y con toma de decisiones consensuadas y sin incurrir en tiempos excesivos. Se buscaron alternativas de innovación en la comunicación y gestión del proyecto para avances parciales y monitoreo hasta su culminación.

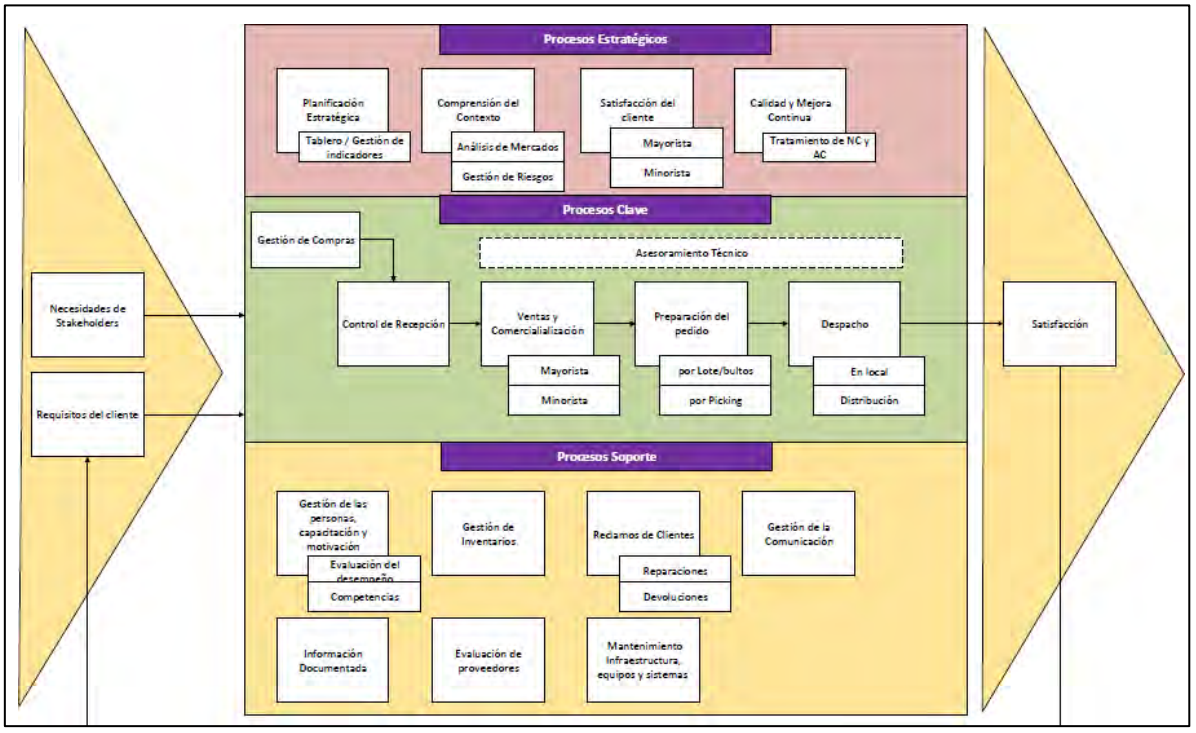



*Figura 2. Mapa de procesos de la empresa. Elaboración propia*

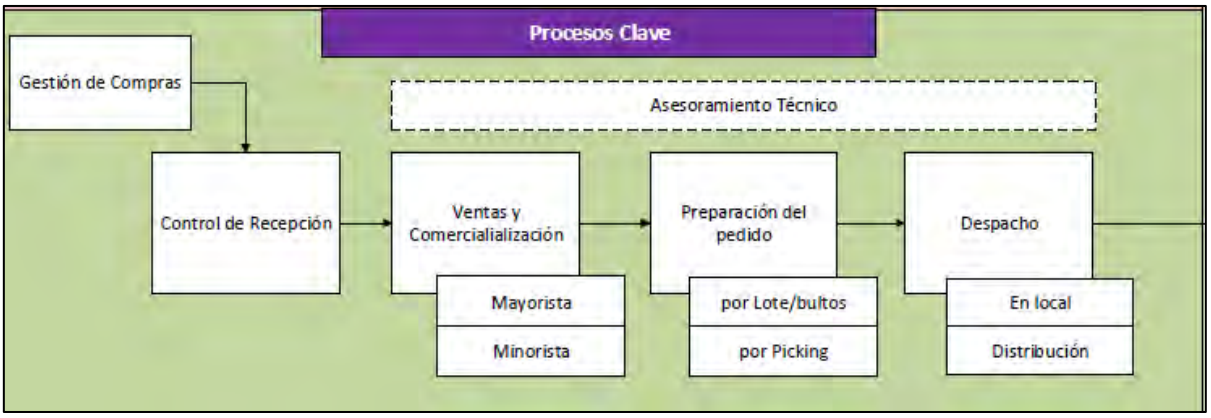



*Figura 3. Procesos clave de la empresa. Elaboración propia*




*Figura 4. Gantt de implementación de la nueva unidad de negocio*

### 2.3 Uso de Trello como herramienta de implementación

El enfoque a procesos fue complementado con metodologías ágiles, que favorecieron la planificación visual mediante tableros y herramientas colaborativas. Se utilizó la herramienta Trello, de acceso libre y gratuito. Esta funciona mediante el método Kanban, dividiendo el trabajo en pasos y moviendo las tarjetas a través de listas.

Así, se realizó el seguimiento de cada tarea, permitiendo a cada integrante ingresar, ver las tareas pendientes y trasladarlas una vez que las finalizaba.

Para armar el Trello, se comenzó creando un nuevo tablero en la plataforma, eligiendo un nombre para el proyecto. Luego, se configuraron las listas que representan las etapas o categorías del flujo de trabajo "Por hacer", "En proceso", “Delegado” y "Hecho" (Figura 5). Dentro de cada lista, se agregaron las tarjetas que correspondían a tareas específicas o actividades a realizar. Cada tarjeta contenía descripciones detalladas, fechas de vencimiento, priorización, miembros responsables asignados y comentarios para facilitar la comunicación. Además, se adjuntaban archivos y listas de verificación para realizar el seguimiento.

La interfaz visual e intuitiva permitió reorganizar tarjetas mediante “arrastrar y soltar”, proporcionando una ágil actualización del estado de cada tarea y promoviendo la colaboración efectiva entre los miembros del equipo de la empresa. A su vez, impulsó la comunicación fluida y la cooperación efectiva

entre diferentes áreas, facilitando un trabajo multidisciplinario y coordinado. Se sentaron las bases para continuar con proyectos de mejora continua internos y multidisciplinarios.

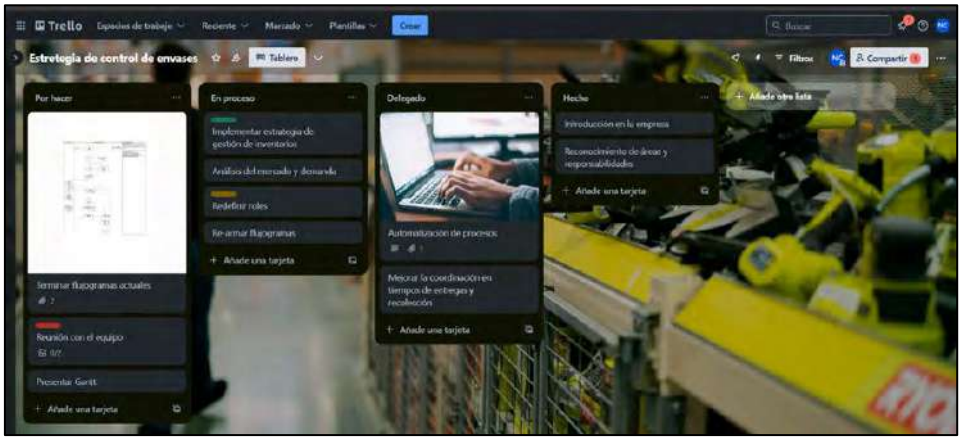



*Figura 5. Pantalla de Trello utilizada*

## 3. RESULTADOS Y APRENDIZAJES

Se examinaron los factores internos, las fortalezas y debilidades de la empresa, y las condiciones externas, incluyendo oportunidades y amenazas presentes en el entorno competitivo y del mercado. A través de este proceso sistemático, se logró obtener un diagnóstico claro y detallado que evidencia las capacidades fundamentales de la organización y los aspectos del entorno que podrían ser aprovechados o mitigados. Este diagnóstico fue clave para detectar la oportunidad de una nueva línea de negocio, asegurando que estuviera alineada con los recursos disponibles, las competencias internas y las tendencias del mercado, facilitando así una estrategia de crecimiento sostenible y sobre todo realista.

La nueva estrategia de gestión de envases permitió optimizar el uso del espacio en almacenes y mejorar la disponibilidad de insumos sin necesidad de incrementar el almacenamiento físico. Esto ha agilizado la logística interna y ha generado un impacto positivo en la administración de costos y la eficiencia operativa, dado que actualmente, existen puntos de control a través de un indicador de rotación de envases formalizado.

Se definió un indicador clave de desempeño o Key Performance Indicator, KPI, por sus siglas en inglés, que permitió medir el objetivo propuesto de aumentar la rotación de envases un 50%, incrementando la rentabilidad de la empresa, en un plazo de 1 año.

Tanto la comunicación, como el compromiso del equipo y el clima de trabajo fortalecieron la cultura de la mejora continua en la empresa. Se destacó la generación de valor tanto para la empresa como para el entorno académico, fortaleciendo el vínculo estratégico universidad-empresa.

La experiencia ofrece oportunidades de réplica en otros sectores y procesos de la empresa PYME. Las futuras líneas de acción incluyen la integración del sistema de inventario con otras áreas clave y la implementación de tecnologías de trazabilidad para lograr un control más eficiente y sostenible del ciclo de vida de los envases.

## 4. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

La integración tecnológica, mejoró la trazabilidad y el control del proyecto, y permitió una rápida respuesta y adaptación frente a posibles cambios en el entorno o en los requerimientos del negocio, asegurando una ejecución eficiente y alineada con los objetivos estratégicos establecidos. Además, resultó un recurso esencial para organizar y monitorear las tareas, establecer etapas críticas del proceso y asignar responsabilidades específicas a los miembros del equipo.

Este caso, demuestra cómo una PYME pueden articular análisis estratégico, procesos clave y herramientas digitales simples para impulsar mejoras concretas en sus servicios, sin necesidad de grandes estructuras. Se pone en valor la combinación de la planificación estratégica, la mejora continua y la agilidad operativa como pilares de la sostenibilidad en contextos dinámicos y competitivos.

## 5. REFERENCIAS


Arciénaga Morales, A. A., Villanueva, B. M., Aguerre, P.E. y Rey, L. G. (2024). *Ingeniería Industrial, Empresa y Estrategia*. Instituto de Ingeniería y Desarrollo Industrial de Salta (IIDISA) y Centro Universitario PYME (CUP). https://aacini.org/libro-ingenieria-industrial-empresa-y-estrategia/

Beck, K., Beedle, M., van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., Grenning, J., Highsmith, J., Hunt, A., Jeffries, R., Kern, J., Marick, B., Martin, R. C., Mellor, S., Schwaber, K., Sutherland, J. y Thomas, D. (2001). Manifesto for Agile Software Development. https://agilemanifesto.org

Boyne, G. y Walker, R. (2010). Strategic Management and Public Service Performance: The Way Ahead. *Public Administration Review,* vol. 70, n°. S1, pp. 185-192. https://doi.org/10.1111/j.1540-6210.2010.02271

Calero Santillan, R. A. y Villavicencio Documet, M. (2024). Incidencia de la aplicación de las metodologías ágiles en el desarrollo del trabajo remoto en el sector financiero [Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Administración, Universidad de Lima]. Repositorio Institucional de la Universidad de Lima. https://hdl.handle.net/20.500.12724/22270

Conti, N., Muñoz, J. I., Hetze, V, y Gallegos M. L. (2025). Oportunidad de mejora y nueva unidad de negocio en Districon. SAMECO 2025

Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J. y Reijers, H.A. (2018). Fundamentos de la gestión de procesos de negocio. *Springer-Verlag*. DOI:10.1007/978-3-662-56509-4 ISBN: 978-3-662-56508-7

Evanthi, A. (2021). The effects of organizational design and decision making process on organizational performance. *Journal of Economics Finance and Management Studies*, vol. 04, nro. 11. https://doi.org/10.47191/jefms/v4-i11-17

Florián, O., Suarez, B., Diaz, D., Obando, S. y Florián-Sánchez.O. (2022). Gestión por Procesos para la Satisfacción del Cliente en una Empresa Mype de Servicios. 2nd LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development. http://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.50

Gürel, Ş. y Tat, M. (2017). SWOT analysis: a theoretical review. J*ournal of International Social Research*, vol. 10, nro. 51, pp. 994-1006. https://doi.org/10.17719/jisr.2017.1832

Ke, Y., Zhao, X., Wang, Y. y Wang, S. (2009). SWOT analysis of domestic private enterprises in developing infrastructure projects in China. *Journal of Financial Management of Property and Construction,* vol. 14, n°. 2, pp. 152-170. https://doi.org/10.1108/13664380910977600

ISO 9000:2015. Sistemas de gestión de la calidad. Fundamentos y vocabulario. ISO -The International Organization for Standardization

Ortíz-Fernandez, J., Baldeón-Tovar, M., Medina-Pelaiza, L., Ortíz-Huamán, C., y Godiño-Poma, M. (2024). Gestión por procesos en las empresas. Una revisión sistémica. *Gestionar: Revista De Empresa Y Gobierno*, *4*(1), 7-22. https://doi.org/10.35622/j.rg.2024.01.001

Porter, M. (1996). What is Strategy? *Harvard Business Review*, nov.-dic., pp. 61-78.

Rivero, A. (2019). Modelo de gestión del conocimiento basado en el enfoque ágil para mejorar la producción en las empresas. Universidad Nacional Federico Villarreal. http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/3887

Whittington, R., Cailluet, L., y Yakis-Douglas, B. (2011). Opening Strategy: Evolution of a Precarious Profession. *British Journal of Management, 22*(3), 531-544. https://doi.org/10.1111/j.1467-8551.2011.00762.x

# ANÁLISIS DE VARIABLES QUE IMPACTAN EN LA PRODUCCIÓN DE LECHE BOVINA UTILIZANDO ANP

Splendiani, Joaquin; Xodo, Daniel;

*Facultad Regional Trenque Lauquen – UTN*

*joacomorard@gmail.com; danielxodo@gmail.com*

**RESUMEN**

La producción de leche bovina está determinada por múltiples factores interrelacionados, como el tipo de explotación, el manejo, la genética, la nutrición, el ambiente y el bienestar animal. Estos factores impactan directa e indirectamente sobre la cantidad y calidad de la leche, condicionando la eficiencia, productividad y rentabilidad del sistema.

Debido a la complejidad de las interacciones existentes, este trabajo propone la aplicación del Proceso Analítico en Redes (ANP), una metodología especialmente adecuada para analizar sistemas multifactoriales con relaciones no lineales ni jerárquicas. El ANP permite modelar la interdependencia entre variables y cuantificar su influencia relativa sobre la producción de leche.

El objetivo principal del estudio es identificar y priorizar los factores que más inciden en la producción lechera en el noroeste de la Provincia de Buenos Aires, comparando los sistemas tradicionales y robotizados, con el fin de aportar información útil para la toma de decisiones en establecimientos agropecuarios.

El estudio se llevó a cabo sobre empresas reales del noroeste de la Provincia de Buenos Aires, lo que permite validar los resultados en contextos productivos concretos y otorga mayor aplicabilidad práctica a las conclusiones obtenidas.

**Palabras Clave:** ANP – Variables – Productividad – Matrices Jerárquicas

**ABSTRACT**

Milk production in dairy cattle is determined by multiple interrelated factors, such as type of farming, management practices, genetics, nutrition, environment, and animal welfare. These factors have both direct and indirect impacts on the quantity and quality of milk, which are crucial for producers as they affect efficiency, productivity, and profitability.

Due to the complexity of these interactions, this project proposes the application of the Analytic Network Process (ANP), a methodology particularly well-suited for analyzing multifactorial systems with non-linear and non-hierarchical relationships. ANP enables the modeling of interdependencies among variables and quantifies their relative influence on milk production.

The study was carried out on real-world farms located in the northwest region of Buenos Aires Province, allowing the validation of results in practical productive contexts and enhancing the applicability of the conclusions reached.

**Keywords:** ANP – Variables – Productivity – Hierarchical Matrices

## 1. INTRODUCCIÓN.

La producción lechera constituye una de las principales actividades agroindustriales de la Argentina, destacándose por su contribución al empleo rural y a la generación de valor agregado. En el noroeste de la Provincia de Buenos Aires, esta actividad enfrenta el desafío de mantener niveles de productividad y calidad en un contexto de creciente competencia, variabilidad climática y demanda tecnológica.

En las últimas décadas, los avances en genética, nutrición y manejo animal han permitido mejoras significativas en la eficiencia productiva. No obstante, la multiplicidad de factores involucrados —como las condiciones ambientales, el bienestar animal, el tipo de explotación, la alimentación y la reproducción— genera una red de interacciones complejas que dificultan la identificación de los determinantes principales del rendimiento lechero (INTA, 2019).

En este escenario, el Proceso Analítico en Redes (ANP) desarrollado por Saaty (2005) se presenta como una herramienta adecuada para el análisis de sistemas donde las variables no se relacionan de manera jerárquica, sino interdependiente. A diferencia del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), el ANP permite modelar retroalimentaciones y dependencias entre factores, lo que brinda una visión más realista de los sistemas productivos agropecuarios (Bellver, 2002).

La presente investigación aplica el ANP para analizar y priorizar los factores que influyen sobre la producción lechera, considerando tanto los aspectos técnicos como ambientales y de bienestar animal. El estudio busca aportar un enfoque metodológico útil para la gestión estratégica de establecimientos lecheros, fortaleciendo la toma de decisiones basadas en evidencia cuantitativa y aplicabilidad práctica.

Asimismo, el trabajo pretende contribuir al debate sobre la adopción de tecnologías de ordeñe robotizado en Argentina, comparando su desempeño relativo con los sistemas tradicionales. De este modo, se espera generar insumos para la planificación de políticas de modernización productiva y sostenibilidad en el sector lácteo nacional.

### 1.1. Objetivo General

Analizar, mediante la aplicación del Proceso Analítico en Red (ANP), la influencia relativa de los factores de manejo, genética, producción, nutrición y ambiente en la producción lechera del noroeste bonaerense, con el fin de comparar y priorizar entre las alternativas de tambo tradicional y tambo robotizado.

### 1.2. Metodología ANP

Proceso Analítico en Red El ANP es una técnica de decisión multicriterio, que fue desarrollada por Thomas L. Saaty con el objetivo de extender las capacidades del Proceso Analítico Jerárquico a casos en los que existe interdependencia y retroalimentación entre los elementos del sistema. Es decir, que el mismo no se comporta como una jerarquía de relaciones sino más bien como una red, lo que permite una modelización más aproximada de la realidad.

Un modelo en red está formado por elementos o nodos (alternativas y criterios de decisión) agrupados en componentes, grupos o clústeres. Los clústeres, se denotan por Ch (siendo h = 1, 2,…, m) y se establece que cada clúster contiene enh elementos que se denotan por e1h, e2h,..., enh. Un elemento de un clúster en la red puede tener influencia sobre algunos o todos los elementos de ese mismo clúster o de otro diferente en la red. Se denomina realimentación a la relación que existe entre los elementos de un mismo clúster y se denomina interdependencia a la relación que existe entre elementos de distintos clústeres.

El proceso se puede especificar en seis pasos esenciales:

1. Identificación y agrupación de los criterios de decisión en clústeres o grupos relacionados.
2. Definición de las alternativas a evaluar.
3. Análisis de la influencia entre los elementos del sistema (criterios y alternativas), construyendo una matriz de relaciones donde se indica con 1 la existencia de influencia y con 0 su ausencia.
4. Construcción de la supermatriz original (unweighted), donde se registran los vectores de prioridad resultantes de las comparaciones pareadas.
5. Construcción de la supermatriz ponderada (weighted), que ajusta las influencias entre grupos y garantiza la estocasticidad por columnas.
6. Obtención de la supermatriz límite, la cual refleja la importancia relativa final de cada criterio y alternativa dentro del sistema.

## 2. MÉTODO ANP.

El Proceso Analítico en Red (ANP) es una técnica de decisión multicriterio desarrollada por Thomas L. Saaty con el objetivo de extender las capacidades del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) a casos donde existe interdependencia y retroalimentación entre los elementos del sistema. El modelo se estructura en clústeres que agrupan criterios relacionados, y permite obtener la importancia relativa de cada variable mediante comparaciones pareadas (Saaty, 2005).

### 2.1. Identificación de criterios y estructura de la red

Para la aplicación del ANP en el ámbito de la producción lechera se definieron cinco clústeres principales, cada uno con sus elementos asociados, además de las alternativas de decisión. Estos criterios surgen de la revisión bibliográfica y del análisis de la dinámica productiva en establecimientos del noroeste bonaerense.

- **Manejo**
  - **M1: Época de apareamiento**
  - **M2: Estado sanitario**
  - **M3: Inseminación**
  - **M4: Monta Natural**
- **Genética**
  - **G1: Raza**
  - **G2: Cantidad de Lactancia**
  - **G3: Edad**
- **Producción**
  - **P1: Cantidad**
  - **P2: Calidad**
- **Nutrición**
  - **N1: Alimento**
  - **N2: Agua**
  - **N3: Balance Energético**
- **Ambiente y Bienestar**
  - **A1: Lluvia**
  - **A2: Temperatura**
  - **A3: Radiación Solar**
  - **A4: Estrés Térmico**
- **Alternativa**
  - **ALT1: Tambo Tradicional**
  - **ALT2: Tambo Robotizado**

Esta estructuración refleja un sistema de producción donde los factores se encuentran interrelacionados. Por ejemplo, la nutrición influye directamente en la producción, pero también en el estado sanitario y en la capacidad de los animales de tolerar condiciones de estrés térmico. De manera similar, la genética determina la potencialidad productiva y la respuesta a distintos manejos reproductivos.

### 2.1.1. Esquema del problema

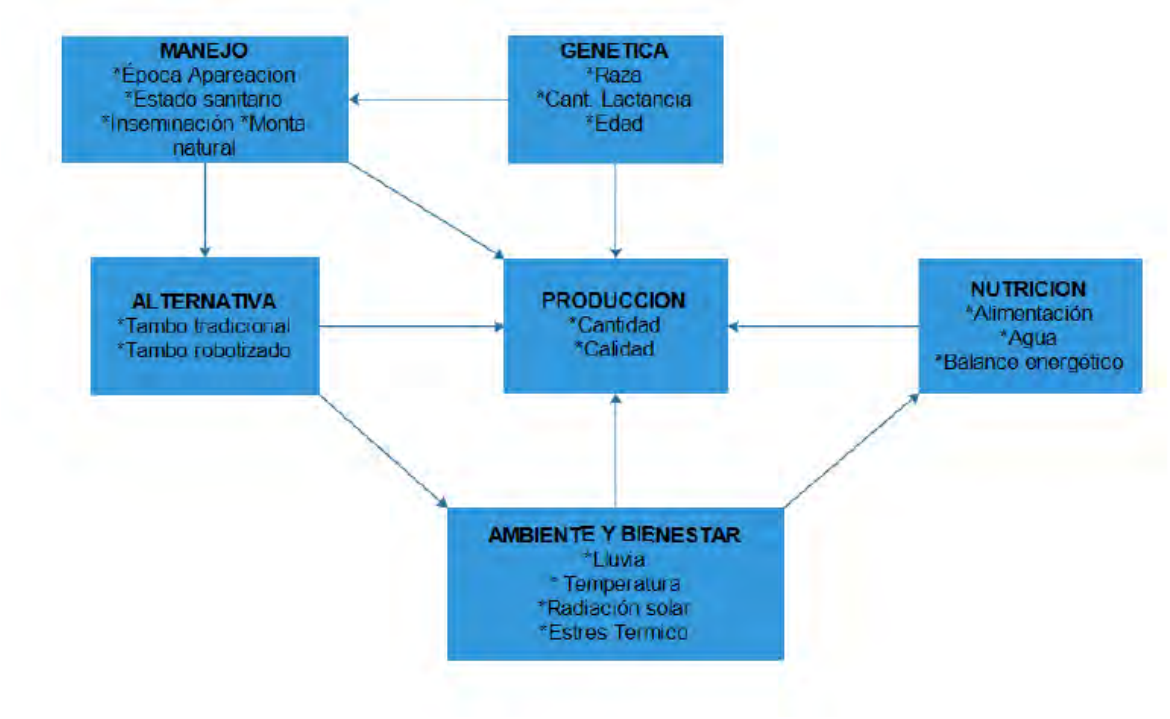



*Ilustración 1-Esquema del Problema*

### 2.2. Relaciones entre criterios: matriz de influencias

Para representar las interdependencias entre elementos se construyó una matriz de correlaciones binaria (0/1). En ella, un valor de 1 indica que el criterio de la fila ejerce influencia sobre el criterio de la columna, mientras que 0 representa ausencia de relación.

| Matriz Dominancia Interfactorial | | Manejo | | | | Genetica | | | Produccion | | Nutricion | | | Ambiente Y Bienestar | | | | Alternativas | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | M1 | M2 | M3 | M4 | G1 | G2 | G3 | P1 | P2 | N1 | N2 | N3 | A1 | A2 | A3 | A4 | ALT1 | ALT2 |
| Manejo | Epoca apareamiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Estado sanitario | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Inseminacion | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Monta natural | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Genetica | Raza | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Cant. lactancia | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Edad | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Produccion | Cantidad | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Calidad | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Nutricion | Alimento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Agua | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Balance energetico | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Ambiente y Bienesta | Lluvia | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Temperatura | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Radiacion solar | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Estres termico | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Alternativa | Tambo tradicional | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Tambo robotizado | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |

*Ilustración 2- Matriz de Relación*

### 2.3. Comparaciones pareadas

Una vez identificadas las influencias, se realizaron comparaciones pareadas entre elementos interdependientes utilizando la escala fundamental de Saaty (1–9). Esta etapa permite cuantificar la intensidad de las relaciones, pasando de una matriz binaria (0/1) a una matriz de juicios con pesos relativos.

## 2.4. Supermatriz Original

Una vez determinados los vectores de prioridad derivados de las matrices de comparación pareada entre los elementos de cada clúster respecto de un elemento de control, se procedió a completar la supermatriz original.

En cada bloque se colocaron los vectores obtenidos, de manera que cada columna reflejara la influencia relativa de los elementos del clúster origen “Y” sobre los elementos del clúster destino “X”. En aquellos casos en que no existía relación de influencia entre clústeres, los espacios correspondientes se completaron con valores cero.

| Supermatriz Original | | Manejo | | | | Genetica | | | Produccion | | Nutricion | | | Ambiente Y Bienestar | | | | Alternativas | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | M1 | M2 | M3 | M4 | G1 | G2 | G3 | P1 | P2 | N1 | N2 | N3 | A1 | A2 | A3 | A4 | ALT1 | ALT2 |
| Manejo | Epoca apareamiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,2083 | 0,1178 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1178 | 0,10 |
| | Estado sanitario | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,6427 | 0,5916 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5916 | 0,68 |
| | Inseminacion | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,101 | 0,236 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,236 | 0,22 |
| | Monta natural | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,048 | 0,0546 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0546 | 0 |
| Genetica | Raza | 0,08 | 0,08 | 0,72 | 0,63 | 0 | 0 | 0 | 0,633 | 0,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,72 | 0,63 |
| | Cant. lactancia | 0,72 | 0,59 | 0,19 | 0,26 | 0 | 0 | 0 | 0,260 | 0,19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,19 | 0,26 |
| | Edad | 0,19 | 0,33 | 0,08 | 0,11 | 0 | 0 | 0 | 0,106 | 0,08 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,08 | 0,11 |
| Produccion | Cantidad | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,83 | 0,25 |
| | Calidad | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,17 | 0,75 |
| Nutricion | Alimento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,33 | 0,28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,63 | 0,26 |
| | Agua | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,12 | 0,07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,11 | 0,11 |
| | Balance energetico | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,55 | 0,64 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,26 | 0,63 |
| Ambiente y Bienesta | Lluvia | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0775 | 0,0775 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0602 | 0,0432 |
| | Temperatura | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,2241 | 0,2241 | 0 | 0,15 | 0,19 | 0,07 | 0 | 0 | 0 | 0,2317 | 0,2447 |
| | Radiacion solar | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1392 | 0,1392 | 0 | 0,07 | 0,08 | 0,28 | 0 | 0 | 0 | 0,153 | 0,1557 |
| | Estres termico | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5591 | 0,5591 | 0 | 0,78 | 0,72 | 0,64 | 0 | 0 | 0 | 0,5551 | 0,5565 |
| Alternativa | Tambo tradicional | 0,75 | 0,50 | 0,25 | 0,83 | 0,50 | 0,75 | 0,25 | 0,83 | 0,17 | 0,75 | 0,50 | 0,25 | 1 | 1 | 1 | 0,17 | 0,5 | 0,5 |
| | Tambo robotizado | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 0,17 | 0,50 | 0,25 | 0,75 | 0,17 | 0,83 | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 0 | 0 | 0 | 0,83 | 0,5 | 0,5 |
| Total | | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 5 | 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 6 | 6 |

*Ilustración 3- SuperMatriz Original*

## 2.5. Comparaciones pareadas entre clústeres

Luego de construir la supermatriz original, el paso siguiente es determinar las prioridades entre clústeres. Este procedimiento se llevó a cabo mediante matrices de comparaciones pareadas, en las que se evaluó la influencia relativa de cada clúster sobre otro dentro de la red de decisión.

A partir de la estructura del modelo aplicado al sistema de producción lechera, se establecieron las siguientes relaciones principales:

- Alternativas (Tradicional y Robotizado) dependen de los demás clústeres, ya que son el resultado de la combinación de factores. En particular, reciben influencia de Manejo, Genética, Nutrición, Ambiente y Bienestar, y Producción.
- Manejo depende de sí mismo y además influye sobre Genética, Producción y Alternativas, dado que las prácticas reproductivas, sanitarias y de rutina condicionan tanto la expresión genética como el rendimiento productivo y la viabilidad de cada sistema.
- Genética depende de las decisiones de manejo, pero influye principalmente en Producción y en la adaptación de las Alternativas, ya que el potencial genético condiciona los litros y sólidos obtenidos, así como la aptitud de los animales para un sistema robotizado o tradicional.
- Ambiente y Bienestar influye directamente sobre la Producción y las Alternativas, pues variables como el estrés térmico, la radiación solar y la temperatura afectan el consumo y la eficiencia en ambos sistemas.
- Nutrición se constituye como un clúster determinante sobre la Producción (cantidad y calidad de leche) y también sobre las Alternativas, ya que la viabilidad de un tambo robotizado, por ejemplo, depende de la oferta de concentrado en el robot y de la estabilidad del balance energético.
- Producción depende a su vez de todos los clústeres anteriores (Manejo, Genética, Nutrición y Ambiente) y constituye la salida intermedia que alimenta la evaluación de las Alternativas.

## 2.6. Supermatriz ponderada

En este punto fue necesario transformar la supermatriz original en una matriz estocástica por columnas, es decir, asegurarse que la suma de cada columna fuera igual a la unidad.

Para corregir esta situación y lograr la condición de estocasticidad, se procedió a calcular la supermatriz ponderada. El procedimiento consistió en multiplicar cada bloque de la supermatriz original por el vector de pesos relativos entre clústeres calculados anteriormente (Punto 3.5).

| Supermatriz Ponderada | | Manejo | | | | Genetica | | | Produccion | | Nutricion | | | Ambiente Y Bienestar | | | | Alternativas | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | M1 | M2 | M3 | M4 | G1 | G2 | G3 | P1 | P2 | N1 | N2 | N3 | A1 | A2 | A3 | A4 | ALT1 | ALT2 |
| Manejo | Epoca apareamiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0913 | 0,0516 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0196 | 0,02 |
| | Estado sanitario | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,2817 | 0,2593 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0986 | 0,11 |
| | Inseminacion | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0443 | 0,1035 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0393 | 0,04 |
| | Monta natural | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,021 | 0,0239 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0091 | 0,00 |
| Genetica | Raza | 0,06 | 0,06 | 0,54 | 0,48 | 0 | 0 | 0 | 0,051 | 0,06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1206 | 0,11 |
| | Cant. lactancia | 0,54 | 0,44 | 0,14 | 0,20 | 0 | 0 | 0 | 0,021 | 0,02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0322 | 0,04 |
| | Edad | 0,14 | 0,25 | 0,06 | 0,08 | 0 | 0 | 0 | 0,009 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0139 | 0,02 |
| Produccion | Cantidad | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1389 | 0,04 |
| | Calidad | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0278 | 0,13 |
| Nutricion | Alimento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,10 | 0,08 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1056 | 0,04 |
| | Agua | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,04 | 0,02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0177 | 0,02 |
| | Balance energetico | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,16 | 0,19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0434 | 0,11 |
| Ambiente y Bienesta | Lluvia | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0118 | 0,0118 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 |
| | Temperatura | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,034 | 0,034 | 0 | 0,12 | 0,14 | 0,06 | 0 | 0 | 0 | 0,0386 | 0,04 |
| | Radiacion solar | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0211 | 0,0211 | 0 | 0,05 | 0,06 | 0,24 | 0 | 0 | 0 | 0,0255 | 0,03 |
| | Estres termico | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0848 | 0,0848 | 0 | 0,58 | 0,54 | 0,54 | 0 | 0 | 0 | 0,0925 | 0,09 |
| Alternativa | Tambo tradicional | 0,19 | 0,13 | 0,06 | 0,21 | 0,5 | 0,75 | 0,25 | 0,03 | 0,01 | 0,75 | 0,125 | 0,0625 | 0,1667 | 1 | 1 | 0,17 | 0,0833 | 0,08 |
| | Tambo robotizado | 0,06 | 0,13 | 0,19 | 0,04 | 0,5 | 0,25 | 0,75 | 0,01 | 0,03 | 0,25 | 0,125 | 0,1875 | 0 | 0 | 0 | 0,83 | 0,0833 | 0,08 |
| Total | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

*Ilustración 4- SuperMatriz Ponderada*

## 2.7. Supermatriz límite

Una vez obtenida la supermatriz ponderada, el siguiente paso fue calcular la supermatriz límite. Este procedimiento se basa en elevar la supermatriz ponderada a potencias sucesivas hasta que alcanza un estado de convergencia.

El resultado es una matriz en la que todas las columnas son iguales, lo que representa un vector de prioridades globales. Este vector muestra el peso final de cada elemento del modelo, considerando no solo las comparaciones locales entre criterios, sino también las relaciones entre clústeres y la ponderación de estos.

| Supermatriz Limite | | Manejo | | | | Genetica | | | Produccion | | Nutricion | | | Ambiente Y Bienestar | | | | Alternativas | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | M1 | M2 | M3 | M4 | G1 | G2 | G3 | P1 | P2 | N1 | N2 | N3 | A1 | A2 | A3 | A4 | ALT1 | ALT2 |
| Manejo | Epoca apareamiento | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Estado sanitario | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| | Inseminacion | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| | Monta natural | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Genetica | Raza | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| | Cant. lactancia | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| | Edad | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Produccion | Cantidad | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| | Calidad | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Nutricion | Alimento | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| | Agua | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Balance energetico | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Ambiente y Bienesta | Lluvia | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Temperatura | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| | Radiacion solar | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| | Estres termico | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| Alternativa | Tambo tradicional | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 |
| | Tambo robotizado | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 |
| Total | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

*Ilustración 5- SuperMatriz Límite*

## 3. RESULTADOS.

La supermatriz límite nos brindó los pesos globales de todos los elementos y de las alternativas evaluadas. Estos valores permiten interpretar no solo cuál de las alternativas resulta más conveniente, sino también qué factores del sistema tienen mayor influencia en la producción lechera.

| | | |
|---|---|---|
| Manejo | Epoca apareamiento | 0,01 |
| | Estado sanitario | 0,07 |
| | Inseminacion | 0,02 |
| | Monta natural | 0,00 |
| Genetica | Raza | 0,07 |
| | Cant. lactancia | 0,06 |
| | Edad | 0,03 |
| Produccion | Cantidad | 0,04 |
| | Calidad | 0,03 |
| Nutricion | Alimento | 0,04 |
| | Agua | 0,01 |
| | Balance energetico | 0,04 |
| Ambiente y Bienesta | Lluvia | 0,00 |
| | Temperatura | 0,03 |
| | Radiacion solar | 0,02 |
| | Estres termico | 0,08 |
| Alternativa | Tambo tradicional | 0,23 |
| | Tambo robotizado | 0,21 |

*Ilustración 6- Tabla de Pesos por Factor*

Los valores finales mostraron que el Tambo Tradicional obtuvo un peso de 0,23, mientras que el Tambo Robotizado alcanzó 0,21. Si bien hay una diferencia, es muy leve, por lo tanto se puede considerar que los dos modelos son competitivos y que la elección del sistema dependerá de factores contextuales (inversión requerida, escala productiva, acceso a tecnología).

### 3.1. Resultados criterios.

A partir de los resultados obtenidos en el modelo ANP, se analizó cómo incide el peso relativo de cada elemento sobre la producción de leche. El estudio permitió identificar cuáles factores ejercen mayor influencia en el sistema y en qué medida afectan el rendimiento productivo. Los valores de los pesos asignados reflejan no solo la importancia individual de cada criterio, sino también las interrelaciones entre ellos, lo que posibilita comprender de manera integral el comportamiento del rodeo lechero.

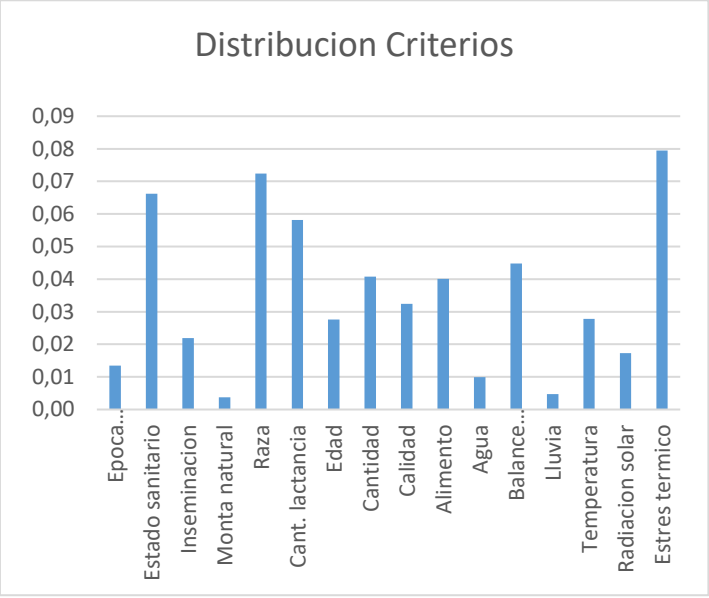



*Ilustración 7-Distribución de los Factores*

El análisis de los pesos de los criterios evidenció que los elementos más determinantes en el sistema son:

- Estrés térmico (≈0,08): principal factor limitante del rendimiento, ya que afecta el consumo, la eficiencia metabólica y la calidad de la leche.
- Cantidad de lactancias (≈0,06): ligada a la longevidad y productividad del rodeo, resulta clave para mantener una producción estable.
- Factores de calidad y cantidad de leche (≈0,04 cada uno): reflejan directamente el objetivo productivo.
- Inseminación y estado sanitario (≈0,02–0,03): componentes de manejo con influencia significativa sobre la expresión genética y la producción.

El análisis realizado evidencia que el estrés térmico es el factor de mayor influencia sobre la producción lechera dentro del modelo ANP, alcanzando el peso global más elevado en la supermatriz límite. Su impacto se explica por los efectos negativos que genera sobre el consumo de materia seca, la eficiencia metabólica y el bienestar animal, lo que se traduce en menor cantidad de litros producidos y una disminución en la calidad de la leche.

## 4. CONCLUSIÓN.

El modelo ANP permitió analizar de forma integral las relaciones entre los factores que inciden en la producción lechera en el noroeste bonaerense. Los resultados evidenciaron que el estrés térmico constituye la variable de mayor impacto, seguido por la cantidad de lactancias y los factores de calidad y cantidad de leche. Estos hallazgos confirman la relevancia de las condiciones ambientales y del bienestar animal en la productividad del rodeo.

Asimismo, la comparación entre el tambo tradicional y el robotizado mostró que ambos presentan niveles de competitividad similares, siendo la elección del sistema dependiente del contexto productivo, la escala de inversión y el grado de tecnificación del establecimiento.

Como futuras líneas de investigación, se propone aplicar nuevamente el método ANP utilizando datos obtenidos a partir de encuestas realizadas a productores rurales. Esto permitirá comparar los resultados con los obtenidos en el presente estudio y verificar el grado de semejanza con la realidad productiva, fortaleciendo así la validez práctica del modelo desarrollado.

## 5. REFERENCIAS.

Saaty, T. L. (2005). Theory and applications of the Analytic Network Process: decision making with benefits, opportunities, costs, and risks. Pittsburgh: RWS Publications.

INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). (2019). *Manejo del estrés calórico en tambos: estrategias de mitigación*. Buenos Aires: INTA.

Jeantet, G. R. Roingrait, M. y Brula,G. (2005) “Ingeniería de los procesos aplicada a la industria Láctea”. Edit.Acribia S.A.

Bellver, J. (2002). *Nuevos métodos de valoración multicriterio*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

**Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Facultad Regional Trenque Lauquen – Universidad Tecnológica Nacional, por el apoyo académico y metodológico brindado durante el desarrollo de esta investigación.

A la colaboración y asesoramiento de los productores de leche del noroeste de la provincia de Buenos Aires, quienes con su experiencia y disposición aportaron información valiosa para la construcción del modelo y la interpretación de los resultados.

# ANALISIS DE VARIABLES EN PRODUCCION DE LECHE BOVINA APLICANDO CADENAS DE MARKOV Y LOGICA DIFUSA

MATASSA, Marcelo Daniel - XODO, Daniel - MORO, Nicolás

*Facultad Regional Trenque Lauquen – UTN*
*mdmatassa@hotmail.com - daniel.xodo@gmail.com - nicomoro1306@gmail.com*

**RESUMEN**

La producción de leche bovina está asociada a variables, riesgos y condiciones de manejo de rodeo, alimentación del ganado, ubicación geográfica, clima, suelo, recursos y tecnología, que inciden en la producción y pueden provocar pérdidas de tiempo, trabajo e inversión.

Determinar los riesgos asociados según las condiciones con distintos tipos de variables en estudio es de suma importancia para la actividad en el sector y afecta los resultados de las inversiones realizadas y las perspectivas de las potenciales

El análisis estadístico e inferencial, con las posibles variaciones resulta útil para cuantificar su incidencia mediante mediciones sistemáticas. El presente trabajo presenta alternativas de clasificación de riesgos por área o sector determinado a partir de la combinación de las variables mediante cadenas de Markov y lógica difusa, observando los resultados obtenidos para determinar acciones de manejo. Los datos a utilizar son información del Servicio Meteorológico Nacional, de la oficina local de INTA y datos de productores de la región.

Las diferencias en resultados a obtener por la influencia de las precipitaciones en diferentes temporadas (considerando la afectación en el ITH) podrá justificar el desarrollo de un soft que permita anticipar decisiones como por el ejemplo el tipo de alimentación, los cuidados sanitarios, etc)

La aplicación de cadenas de Markov y análisis mediante lógica difusa (Fuzzy Logic) de la incidencia de los distintos factores , permitirá anticipar las condiciones de riesgo a la producción de leche bovina facilitando las acciones acordes a las condiciones de uso determinando las decisiones para el manejo del tambo

**Palabras claves:** Variables – Productividad - Riesgos – Cadenas de Markov - Lógica Difusa –

**Abstract**

Bovine milk production is associated with variables, risks and conditions of herd management, cattle feeding, geographical location, climate, soil, resources and technology, which affect production and can cause loss of time, work and investment.

Determining the associated risks according to the conditions with different types of variables under study is of utmost importance for the activity in the sector and affects the results of the investments made and the prospects of potential

Statistical and inferential analysis, with the possible variations, is useful to quantify its incidence through systematic measurements. The present work presents alternatives for the classification of risks by area or sector determined from the combination of the variables by Markov chains and fuzzy logic, observing the results obtained to determine management actions. The data to be used are information from the National Meteorological Service, the local INTA office and data from producers in the region.

The differences in results to be obtained due to the influence of rainfall in different seasons (considering the impact on the ITH) may justify the development of a software that allows anticipating decisions such as the type of feeding, health care, etc.)

The application of Markov chains and analysis by fuzzy logic of the incidence of the different factors will allow anticipating the risk conditions for the production of bovine milk, facilitating actions according to the conditions of use, determining decisions for the management of the dairy

**Keywords:** Variables – Productivity – Risks – Markov chains – Fuzzy logic –

## 1. Introducción.

Determinar los riesgos asociados a los distintos procesos que realizan las Empresas locales o Zonales, se relaciona directamente a la entrada y salida de los recursos e insumos que intervienen en cada muestra y la naturaleza de cada actividad. Es necesario evaluar con un mismo sistema difuso, para optimizar cada una de las variables en estudio.

### 1.1. Objetivo principal

Determinar el tipo variables que optimicen la economía sustentable de una empresa y riesgos asociados a las condiciones en cada proceso, aplicando técnicas de lógica difusa.

### 1.2. Objetivos complementarios

Determinar la metodología adecuada para cada muestra en estudio.

### 2.-. METODOLOGIA:

Agrupar las variables, de acuerdo a su proceso y uso de recursos que influyen en la optimización, para su objetivo.

Asignar magnitudes escalares, para encuadrar a cada muestra en estudio.

Modificar escalas o adaptar las magnitudes escalares, dentro de zonas difusas, para ver en qué proporción se muestra de forma más óptima.

### CRONOGRAMA:

**1era. Etapa**: Etapa descriptiva, asignando a las distintas necesidades de aplicación:

**2da. Etapa:** determinar las variables en estudio y definirlas para cada proceso, su composición física y las características que la componen. Tabular las variables y comparar con los valores de referencia que dan las tabulaciones de las entidades oficiales autorizadas.

**3ra. Etapa:** Seleccionar una herramienta aplicando lógica difusa, para determinar con métodos no lineales, los valores óptimos, para promediar las distintas variables en estudio.

**4ta. Etapa**: Evaluar cada proceso en estudio y asignar los valores, para medir y determinar la comparación observada en cada muestra con la normativa aplicada.

**5ta.etapa:** Tabular y registrar conclusiones observadas.
Comparar con la norma de sustentabilidad elegida y ordenar de acuerdo a los resultados, el orden y prioridad de aplicación de las distintas muestras, y las variables en estudio con sus factores y recursos utilizados en cada proceso.

***2.*** **Metodología de análisis de las variables**: Elegimos cinco variables que influyen en forma directa, para poder clasificar y ponderar la optimización y uso posterior.

El suelo es la variable que muestra el estado del predio en estudio, con las características de apoxia o anoxia, mayor o menor presencia de oxígeno, humedad, aridez y acidez del suelo, que es factor preponderante en el desarrollo de pasturas, necesario para la producción de leche.

**2.1. ANIMALES/HECTAREA**: Utilizados para entrar a diferentes procesos de producción de leche bovina, definidos como insumos o materias primas de acuerdo a su uso o transformación posterior. Los recursos son clasificados para su aplicación con anterioridad.

Medir el uso de los distintos tipos de recursos aplicados; físicos, biológicos, tecnológicos, económicos, financieros, humanos, etc.

***2.2*. GENETICA**: Se relaciona directamente a la genética del animal, relacionada a calidad de producción previa clasificación y análisis de su naturaleza o clasificación posterior.

***2.3*. SANIDAD:** Es la cantidad de vacas con enfermedad, mastitis, aftosa u otra que afecte directamente al animal, indirectamente puede mejorarse con el manejo del rodeo y la alimentación.

***2.4*.**.**PRODUCCION/EFICIENCIA**: La producción de leche es proporcional a la eficiencia, las variables que modifican esta es la genética, las pariciones del animal y futura producción.

***2.5***. **FORRAJE**: Se relaciona a la cantidad de animales por hectárea y el forraje que puede variar de 7000 a 8000 kg/hectárea. La calidad del pasto y los factores edafológicos del suelo

Los valores para cada muestra en estudio:

**ANIMALES/HA.**: Tabulamos en porcentajes para aplicar el método AHP, de acuerdo a la estructura de cada muestra se toman la muestra de 1 animal a 4 animales por hectárea.

Baja: {1; 2} = {1; 10; 20 y 30%} Optima

Media: {2, 3} = {30; 40; 50 y 60%}

Alto: {3; 4} = {60; 70; 80; 90 y 100%}

**GENETICA:** Calidad animal, genética, enfermedades como aftosa o mastitis, manejo de lactancia, etc.:

Baja: {20; 30 Y 40%}

Media: {40; 50 60%} Optima

Alta: {60; 70 Y 80%}

**SANIDAD**: Para aplicar el porcentaje para este estudio tomamos la producción /vacas s/enfermedades como mastitis, aftosa, estrés animal, ambiente, bienestar animal, etc.:

Baja; {30; 40; 50 y 60%}

Media: {50; 60 y 70%} Optimo

Alta: {70; 80; 90 y 100%}

**PRODUCCION/EFICIENCIA:** Tabulamos en porcentajes estimados en litros de leche/kg de materia seca que consume el animal, nivel de proteína y manejo del rodeo, equipamiento, cantidad de ordeñe diario, etc.

Baja: {30; 40 y 50 %}

Media: {50; 60; y 65 %} Estable

Alta: {60; 70 y 80%} Optima

**FORRAJE**: En porcentajes estimados: [5000 a 12.000 kg de materia seca]:

Baja: {40, 50 y 60%}

Media: {50; 60; y 70%} Optima - estable

Alta: {70; 80; 90 y 100%}

La muestra elegida para la aplicación de esta herramienta, utilizando las ponderaciones de cada una de las variables elegidas: ANIMALES/HA, GENETICA, SANIDAD, PRODUCCION-EFICIENCIA Y FORRAJE, en la elección de cada muestra, condicionada a los factores climáticos y edafológicos de cada muestra en estudio.

**3. Cadenas de Markov:**

Es una herramienta que permite tomar decisiones jerarquizando una estructura de variables interrelacionadas, aplica método multicriterio establece la variación de valores que alcanzan las variables, a partir de las muestras relevadas para cada caso en estudio. Utilizado para ponderar y jerarquizar los activos y el comportamiento de cada variable en su interrelación con el medio y ciclo de lluvias año 2024, sensibilizando cada valor y su influencia para la toma de decisiones.

La homogeneidad y consistencia de cada medición está condicionada la manejo del rodeo, con la cantidad de animales por Hectárea y los períodos de rotación y alimentación, con ciclos de pastura, y condiciones del clima y suelo, variables no constantes en la medición de cada ciclo productivo, variando cada muestra en los períodos establecidos para este trabajo.

Para el armado de la matriz estocástica, tomamos las mediciones tomadas en el partido de Trenque Lauquen,

**3.1.** Matriz comparación de variables con probabilidad de lluvias:

Las lluvias se clasifican según su intensidad en débiles (menos de 2.5 mm/h), moderadas (entre 2.5 y 7 mm/h), fuertes (entre 7 y 30 mm/h), muy fuertes (entre 30 y 60 mm/h) y torrenciales (más de 60 mm/h). Esta clasificación se basa en la cantidad de agua que cae por unidad de tiempo y lugar, medida comúnmente en milímetros por hora (mm/h).
Niveles de Intensidad de Lluvia:

- Lluvia débil o ligera: Intensidad inferior a 2,5 mm/h.
- Lluvia moderada: Entre 2,5 y 7 mm/h.
- Lluvia fuerte: Entre 7 y 30 mm/h.
- Lluvia muy fuerte: Entre 30 y 60 mm/h.
- Lluvia torrencial: Más de 60 mm/h.

Consideraciones

- Variabilidad Regional:

Es importante notar que estos valores pueden variar ligeramente dependiendo de la región y la fuente.

El armado de reglas para la comparación estadística :

Débil a débil: 2,5

Débil a moderado 2,5 a 7

Débil a fuerte 7 a 30

Débil a muy fuerte: 30-60

Torrencial: 60

Tabla 1*. Matriz de Markov : Probabilidad con ciclos de lluvias.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| < 2,5 | Débil | Débil | 6 - 0,33 |
| 2,5 - 7 | Débil | Moderado | - |
| 7 - 30 | Débil | Fuerte | 7 - 0,34 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 30 -60 | Débil | Muy fuerte | 5 - 0,28 |
| >60 | Débil | Torrencial | - |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 2,5 - 7 | Moderado | Débil | 3 - 0,75 |
| 2,5 - 7 | Moderado | Moderado | - |
| 7 - 30 | Moderado | Fuerte | - |
| 30-60 | Moderado | Muy fuerte | - |
| > a 60 | Moderado | Torrencial | 1 - 0,35 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 7-30 | Fuerte | Débil | 4 - 0,27 |
| 2,5-7 | Fuerte | Moderado | 1 - 0,07 |
| 7-30 | Fuerte | Fuerte | 2 - 0,13 |
| 30-60 | Muy fuerte | Muy fuerte | 3 - 0,20 |
| >60 | Muy fuerte | Torrencial | 5 - 0,33 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 30-60 | Muy fuerte | Débil | 3 - 0,23 |
| 2,5-7 | Muy fuerte | Moderado | - |
| 7-30 | Muy fuerte | Fuerte | 1 - 0,08 |
| 30-60 | Muy fuerte | Muy fuerte | 2 - 0,15 |
| >60 | Muy fuerte | Torrencial | 7- 0,54 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| >60 | Torrencial | Débil | 4 - 0,12 |
| 2,5-7 | Torrencial | Moderado | 2 - 0,06 |
| 7-30 | Torrencial | Fuerte | 4 - 0,12 |
| 30-60 | Torrencial | Muy fuerte | 6 - 0,17 |
| >60 | Torrencial | Torrencial | 19 – 0,54 |

| | débil | moderada | fuerte | Muy fuerte | torrencial |
|---|---|---|---|---|---|
| débil | 0,33 | 0 | 0,39 | 0,28 | 0 |
| moderada | 0,75 | 0 | 0 | 0 | 0,2 |
| fuerte | 0,27 | 0,07 | 0,13 | 0,20 | 0,33 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Muy fuerte | 0,23 | 0 | 0,08 | 0,15 | 0,54 |
| Torrencial | 0,115 | 0 | 0,115 | 0,17 | 0,54 |

| | débil | Moderado | fuerte | Muy fuerte | torrencial |
|---|---|---|---|---|---|
| débil | 1 | 1/5 | 1/9 | 1/7 | 1/3 |
| moderada | 5 | 1 | 1/5 | 1/3 | 3 |
| fuerte | 9 | 5 | 1 | 3 | 7 |
| Muy fuerte | 7 | 3 | 1/3 | 1 | 5 |
| Torrencial | 3 | 1/3 | 1/7 | 1/5 | 1 |

| | Débil | Moderado | Fuerte | Muy fuerte | Torrencial |
|---|---|---|---|---|---|
| débil | 0,2362 | 0,0339 | 0,1721 | 0,1916 | 0,3659 |
| moderada | 0,2365 | 0,03388 | 0,1724 | 0,1918 | 0,3652 |
| fuerte | 0,2367 | 0,0340 | 0,1719 | 0,1915 | 0,3663 |
| Muy fuerte | 0,2358 | 0,0340 | 0,1716 | 0,1913 | 0,3670 |
| Torrencial | 0,2358 | 0,0340 | 0,1716 | 0,1913 | 0,3670 |

La probabilidad de la matriz con ciclos de lluvias, da como resultado para mostrar la aplicación de lógica difusa, y ver el gráfico de superficie de producción y eficiencia con Ciclo de lluvias débil a moderado 0236 + 0,0339=0,269 equivale a 27%. Ciclo de lluvias fuerte a muy fuerte 0,191+0,365=0,556 equivale a 56%.

**4. Sistemas de lógica difusa:**

Utilizar un sistema de Lógica Difusa (FLS) y manejar datos numéricos y lingüísticos a la vez. Este sistema es un mapeo no lineal de un vector de datos de entrada en un escalar de salida. En el caso de un vector de salida, este puede descomponerse en una colección independiente de sistemas “múltiple entrada / simple salida”.

La riqueza de la lógica difusa consiste en que hay numerosas posibilidades de manejar lotes de mapeos diferentes. Esto requiere una comprensión cuidadosa de lógica difusa y de los componentes de un sistema de lógica difusa.
Un sistema de control difuso mapea entradas y salidas y sus cuatro componentes: reglas, fusificador, motor de inferencia y defusificador. Una vez que las reglas han sido establecidas, un FLS puede ser visto como un mapeo que puede ser expresado cuantitativamente como

*Y=f(X).* *(1) función de X.*

Las reglas pueden ser provistas por expertos o extraídas de datos numéricos. En todo caso, son expresadas como una colección de sentencias IF-THEN. De las reglas se debe conocer:

- Variables lingüísticas en contraposición a los valores numéricos de una variable.
- Mixtas: Son las reglas que utilizan los conectivos “y” / “o” en forma conjunta. Pueden ser descompuestas usando las técnicas estándar.
- Estados Difusos: Estas reglas no tienen antecedentes Comparativas: Son del tipo *“el menor de u, el mayor de v”.* Se pueden reformular estas reglas al formato estándar. En este caso: IF *u* is *S* THEN *v* is *B*, donde *S* representa el conjunto difuso “el menor” y *B* representa al conjunto difuso “el mayor”.

.

**4.1. Defusificación**

El proceso de defusificación toma el conjunto difuso que es la salida del bloque de inferencia y produce una salida crisp. Es decir, mapea conjuntos difusos en puntos crisp. Muchos defusificadores han sido propuestos en la literatura, sin embargo, no hay bases científicas (ninguno de ellos ha sido derivado de un principio tal como "la maximización de la información difusa" o "la entropía") para algunos autores, la defusificación es más un arte que una ciencia. Existen diferentes tipos de defusificadores, entre los más importantes se encuentran: El médodo de defusificación con Centroide determina el centro de gravedad $\bar{y}$ de *B*, conjunto difuso mayor y usa ese valor como salida del Sistema de Lógica Difusa. Se obtienen: *Y*= Conjunto difuso mayor; Y= Conjunto difuso menor. El centroide posibilita determinar la salida menor, para ponderar la optimización de variables, con el mínimo valor de salida, determina, que tipo de composición y valor tiene cada variable en estudio.

**Modelo Difuso de Mamdani**

La configuración del modelo difuso de *Mamdani* se muestra en la Figura 1. En esta clase de modelos difusos, las reglas difusas *IF/THEN* (*SI/ENTONCES)* son de la forma:

$R^i$: *SI* $x_1$ *es* $A^i_1$ *y* $x_2$ *is* $A^i_2$ *y....y* $x_n$ *es* $A^i_n$ *ENTONCES y is* $B^i$=0 (2) Regla difusa

Las principales ventajas del modelo difuso de *Mamdani* se especifican a continuación. Primero, su simplicidad en la representación de las reglas difusas, tanto las premisas como los consecuentes tienen forma de conjunto difuso lo que facilita su interpretación. Segundo, su flexibilidad en la materialización debido a la posibilidad de seleccionar las operaciones del motor de inferencia, del fusificador o defusificador.

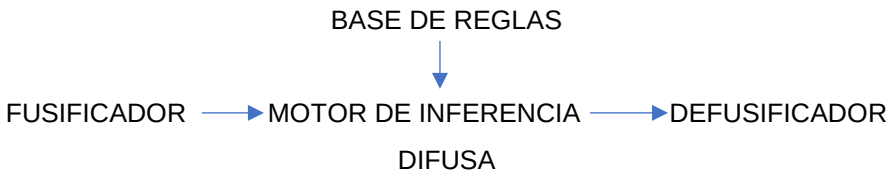



Figura 1. *Modelo Difuso de Mamdani*.

La principal desventaja de este modelo difuso es que para sistemas complejos no lineales usualmente se requieren muchas reglas difusas "IF/THEN (SI/ENTONCES)", lo cual hace más compleja su materialización.

1. Los conectores lógicos para variables lingüísticas (y, *o*).
2. Las implicaciones *IF(SI) a THEN(ENTONCES) b.*
3. Cómo combinar un conjunto de reglas.

El justificador mapea valores numéricos crisp en conjuntos difusos. Es necesario para activar reglas, que están en términos de variables lingüísticas y tienen asociados conjuntos difusos.

El motor de inferencia de un FLS mapea conjuntos difusos en conjuntos difusos, mediante la combinación de reglas "IF/THEN (SI/ENTONCES)". Como los humanos usan distintos tipos de procesos de inferencia, para entender cosas o tomar decisiones, un FLS puede usar distintos procedimientos de inferencia difusa. El defusificador mapea conjuntos de salida difusos en números crisp. En aplicaciones de control, tales números corresponden a las acciones de control a tomar.

La elección de una herramienta de uso general y de conocimiento en su aplicación, hace que el MATLAB, sea la herramienta para agrupar y ponderar las variables en estudio.

**4.2. Matriz**

La matriz para justificar las reglas a aplicar en si "and" si "and" si "and" then "entonces".

Tabla 2 *Matriz de armado de reglas*

| ENTRADA | | | | | SALIDA |
|---|---|---|---|---|---|
| **ANIMALES/ HA.** | **GENETICA** | **SANIDAD** | **PRODUCCION EFICIENCIA** | **FORRAJE** | **COEFICIENTE DE SALIDA** |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ALTO | BAJO | BAJO | BAJO | ALTO | ALTO |
| ALTO | BAJO | BAJO | MEDIO | MEDIO | MEDIO |
| ALTO | BAJO | MEDIO | MEDIO | MEDIO | MEDIO |
| ALTO | MEDIO | MEDIO | ALTO | BAJO | BAJO |
| MEDIO | MEDIO | MEDIO | ALTO | BAJO | MUY BAJO |
| MEDIO | MEDIO | ALTO | ALTO | ALTO | BAJO |
| MEDIO | ALTO | ALTO | ALTO | MEDIO | BAJO |
| BAJO | ALTO | ALTO | ALTO | BAJO | MUY BAJO |
| ALTO | ALTO | ALTO | ALTO | BAJO | MUY BAJO |
| ALTO | BAJO | BAJO | ALTO | MEDIO | BAJO |
| ALTO | MEDIO | ALTO | BAJO | ALTO | ALTO |
| ALTO | MEDIO | MEDIO | BAJO | MEDIO | ALTO |
| ALTO | MEDIO | ALTO | BAJO | MEDIO | ALTO |
| ALTO | ALTO | BAJO | ALTO | BAJO | BAJO |
| BAJO | ALTO | ALTO | BAJO | MEDIO | ALTO |
| BAJO | ALTO | ALTO | BAJO | ALTO | ALTO |
| BAJO | ALTO | MEDIO | MEDIO | MEDIO | MEDIO |
| NO TIENE | NO TIENE | BAJO | BAJO | ALTO | MUY ALTO |

**5. TABULACION PARA LA MUESTRA**:

La muestra elegida para la aplicación de esta herramienta, utilizando las ponderaciones de cada una de las variables elegidas: ANIMALES/HA, GENETICA, SANIDAD, PRODUCCION-EFICIENCIA Y FORRAJE, en la elección de cada muestra, condicionada a los factores climáticos y edafológicos de cada muestra en estudio.

**5.1 ANALISIS DE LAS MUESTRAS**

La 1ra. muestra para valores promedios con salida óptima en 6,46 resulta el 64,60 % con valores: ANIMALES/HA.: 70%; GENETICA: 50%; SANIDAD: 52% media; PRODUCCION/EFICIENCIA: 50 %; FORRAJE: 50%.

La utilización de MATLAB permite, relacionar las variables, con sus escalas de ponderación. Las reglas se arman de la forma IF-AND-THEN-y la variable de salida y la prioridad es con salida: “Muy alta, Alta, Media, Baja o Muy Baja”. Armado de reglas difusas:

If ANIMALES/HA MEDIA “and” GENETICA MEDIA “and” SANIDAD MEDIA “and” PRODUCCION/EFICIENCIA MEDIA “and” FORRAJE MEDIA “then” SALIDA MEDIA ALTA

5.1.a) If {70 a 85% ; 49 a 52% ; 51 a 52% ; 50 a 51% ; 50 a 51%; 50 a 70%} = 6,46

5.1.b) If {45 a 60% ; 55 a 61% ; 70 a 72% ; 55 a 57% ; 25 a 35%} = 5,00

5.1.c) If {45 a 60% ; 55 a 56% ; 70 a 72%; 51 a 52% ; 53 a 75%} = 5,62

5.1.d) If {45 a 55% ; 52 a 54% ; 68 a 69%; 51 a 53% ; 70 a 85% } = 5,36

5.1.e) If {40 a 50% ; 50 a 51% ; 48 a 55%; 65 a 80% ; 85 a 90% } = 5,39

Promedio 6,46 con salida en baja óptimo 5,00.

Regla 5.1.a) Variación en baja de promedio en centroide bajando de 6,46 (64,60%) a 5,00 (50%) regla 5.1.b) en baja por mediar solamente ANIMALES/HA aumenta la SANIDAD y GENETICA con media alta aumento 52 a 70% en 18% y en FORRAJE, con variación de 13,50 % regla 4.1.b) y regla 4.1.c) con 14,45% aumentando ANIMALES/HA de 2 a 3 manteniendo GENETICA y SANIDAD y aumentando 11 % el FORRAJE.

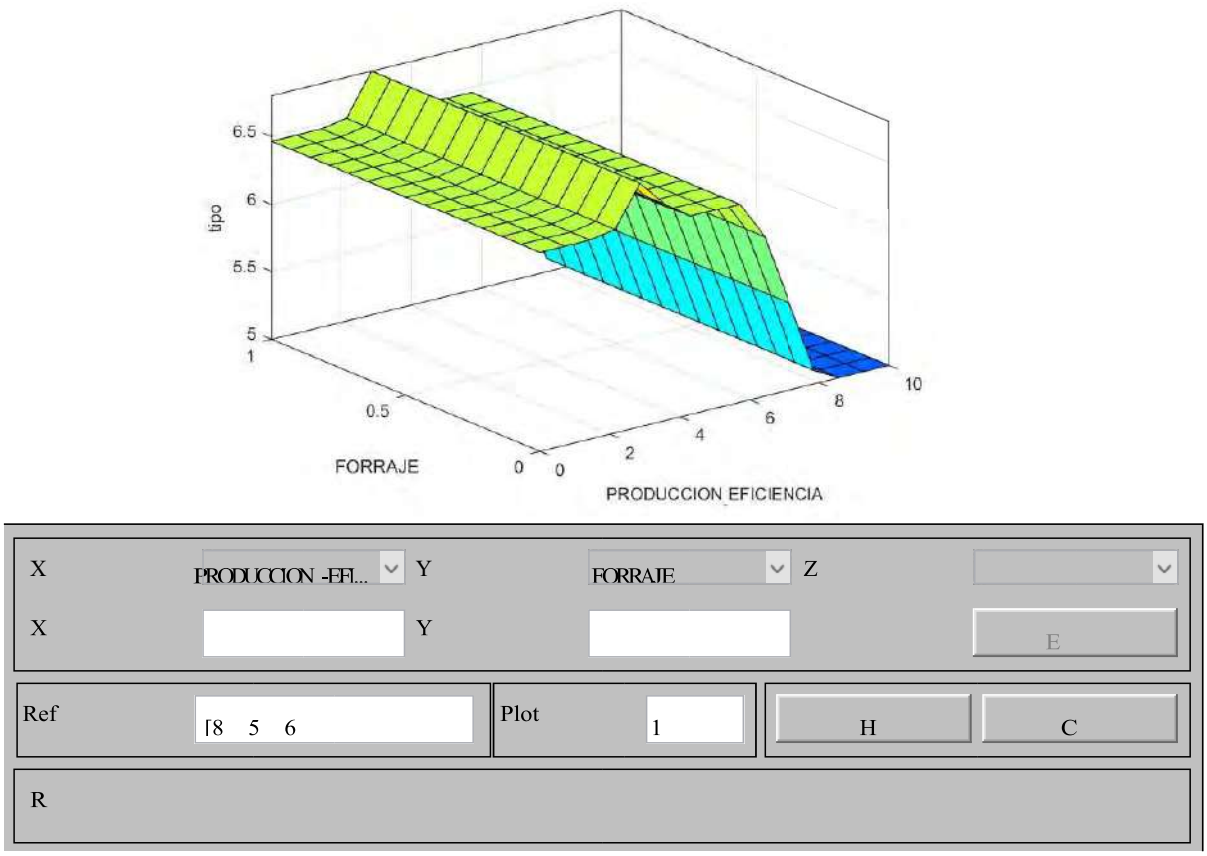



Figura 2. *Gráfico de Forraje con ciclo de lluvias bajo.*

Muestra 1: Grafico con ciclo de lluvias bajo consumo de materia seca por animal de 5.500 a 7.500 kg/materia seca muestra mayor consumo y producción y eficiencia, con baja de riesgo cuando aumenta el ciclo de lluvias de moderado a muy fuerte, con valores de 50 a 70%. Las reglas óptimas dan como valor promedio de aplicación **6,46** y se da en las siguientes combinaciones de variables:

ANIMALES/HA: {5,0; 5,2 y 5,5} = 50% media (2 animales/ha.)

GENETICA: {4,6; 5,0 y 5,5} = 52% media

SANIDAD: {5,0; 5,5 y 5,9} = 51% media

PRODUCCION/EFICIENCIA: {4, 8; 5,00; 5,05; 5,10} = 51 % media

FORRAJE: {4,5; 5,00; 5,55; 6,00} = media 7500 kg/materia seca

FORRAJE: {7,00, 8,00, 9,00 y 10} = alto 12000 kg/materia seca

La variable ANIMALES/HA, se muestra sensible las variaciones de PRODUCCION-EFICIENCIA como variable más importante, en aumento respecto a la muestra nro. 1 de 50% a 62,50 %, estable, modificando el promedio de salida de 6,46 a 5, varía el promedio óptimo de coeficiente de salida de un 14,6%, en la muestra nro.1, tomando menor riesgo y composición de cada variable. Regla óptima: Si ANIMALES/HA media 50% “y” GENETICA media 51% “y” SANIDAD media 52 % y” PRODUCCION-EFICIENCIA media 50% FORRAJE media 51% “entonces” salida media. Valor 5 en aumento 6,46 promedio en aumento a 64,6% y si aumenta la variable ANIMALES/HA. de media a alta de 3 a 4 animales por hectárea, aumenta el consumo de forraje y materia seca.

### *5.2. CONCLUSIONES: MUESTRA NRO.1*

La variable ANIMALES/HA. incide con los porcentajes 50 % que componen la muestra variación de 2 a 2,5 animales en el manejo de rodeo.

GENETICA presenta forma homogénea valor 50 a 52%.

SANIDAD: Muestra la presencia entre medio y alto 50 a 60% libre aftosa, mastitis y peso metabólico para mantenerse energéticamente el animal.

PRODUCCION/EFICIENCIA: Medimos la productividad y eficiencia en litros/hectárea/año y la producción individual por animal, dependiendo del fator humano para el ordeñe.

FORRAJE: aumenta de 70 a 85%. La cantidad de individuos por hectárea de 2 a 2,5 manejo de rodeo, pastoreo, tomando directamente relación con la variable ANIMALES/HA.

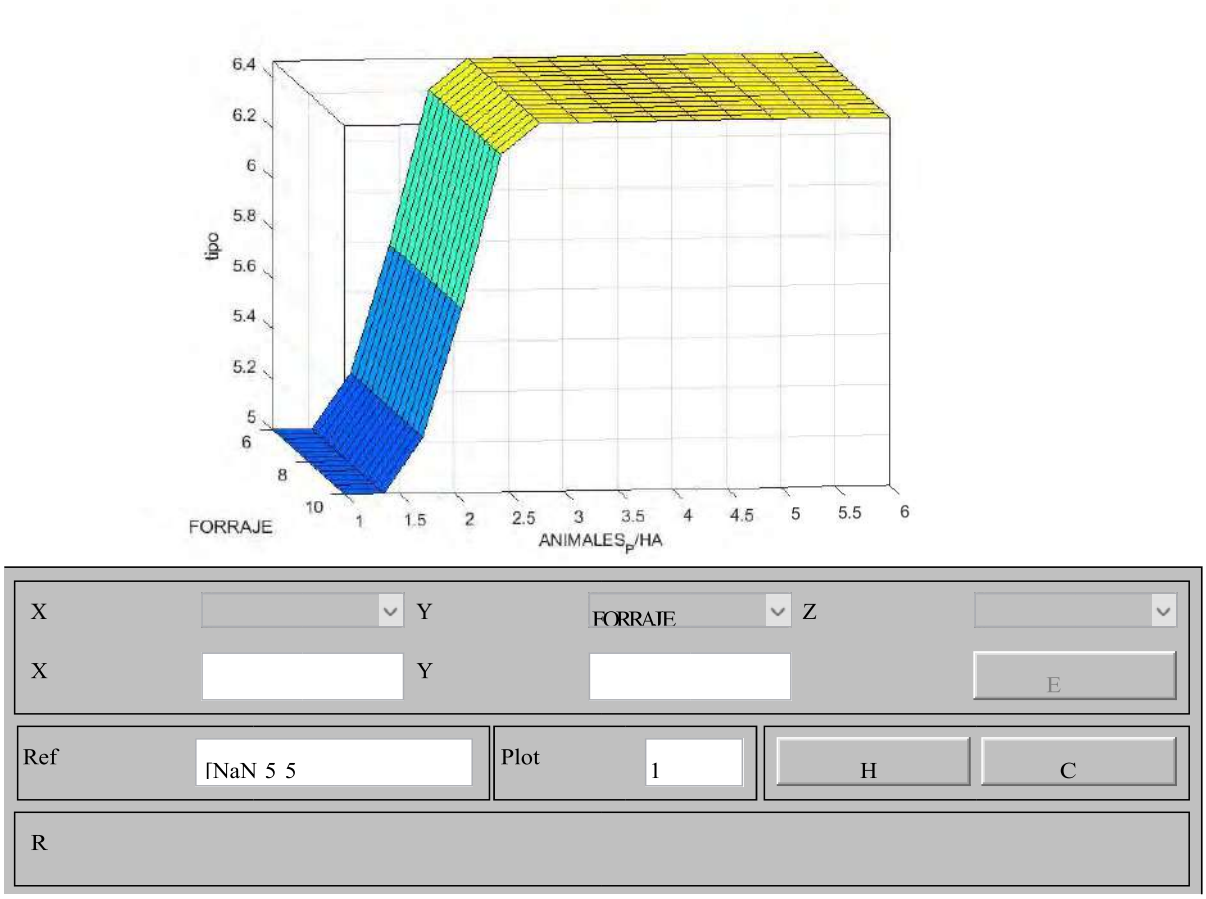



Figura 3. *Gráfico de superficie Forraje con ciclo de lluvias alto.*

## 5.3. CONCLUSIONES MUESTRA NRO.2

En la muestra 2 con ciclo de lluvias moderado, Muy alto mantiene ANIMALES/HA con riesgo bajo de promedio 5 equivalente a 50%, con subas cuando se incrementa la cantidad de animales de 1,5 a 3 animales/ha. Mantiene la producción media y pasturas con promedio de 6,46 a 64,6 % hasta 4 animales/ha.

En segunda ubicación la variable FORRAJE con promedio de lluvias en aumento, el ciclo estacional aumenta el pasto y la producción de leche aumenta, proporcional al consumo de pasto verde, si aumenta el consumo de materia seca constante con un valor 5,00 y aumenta el porcentaje 65 a 75%, para optimizar la muestra, materia seca mantiene en un consumo de 35%.

Tercera ubicación la variable SANIDAD inciden directamente en salida óptima 5, pasan de valor 51 % A 72,5%, relacionado al bienestar animal, alimentación y manejo del rodeo en cada ordeñe.

En cuarta ubicación la variable PRODUCCION-EFICIENCIA mantiene valores de 50 a 54% en equipamiento y cantidad de ordeñe, si aumenta la inversión se tiene que amortizar el valor del equipamiento, inciden las variables anteriores para bajar el promedio de riesgo asociado.

La variable GENETICA mantiene su valor entre 50 a 61%, se mantiene aumentando el 11%, para mantener salida óptima en 5.

Se mantiene FORRAJE con promedio de lluvias en aumento, si aumenta el consumo de materia seca constante con un valor 5,00 y aumenta el porcentaje 65 a 75%, para optimizar la muestra, que baja a 5,39.-

De 5,41 a 5,00 cuando se da el mayor registro en ciclos de lluvias máximo o torrencial.

El método del centroide muestra los valores mínimos del conjunto de las variables en estudio y su punto óptimo de salida, de la tabulación de la matriz utilizada. Si aumenta el número de animales por hectárea, se alimentan menos, consumiendo mayor cantidad de forraje, para mantener el peso y de acuerdo al ciclo de lactancia o número de parto de 1er. a 4to parto, mayor eficiencia y productividad en el 2do al 4to.coeficiente de salida a 5 estable.

## 5.4. CONCLUSIONES DE RIESGO ASOCIADO:

La aplicación de Cadenas de Markov permitio diferenciar dos períodos diferentes en el régimen de lluvias que darán lugar a diferentes disponibilidades de pasturas y por lo tanto diferentes requerimientos de alimentación suplementaria.

La Lógica difusa y las muestras observadas con el grado de ponderación máximo y mínimo, permite relacionar variables de diferente naturaleza y en escalas distintas de cuantificación, que pueden modificarse por condiciones climáticas, por exceso o falta de lluvias y las variaciones estacionales de la temperatura, estimadas por registros propios factores edafológicos y ciclo de lluvias estacionales proporcionados por entes oficiales o privados hace posible definir en forma escalar las ponderaciones de cada variable, a fin de maximizar los valores alcanzados en zonas difusas, definiendo su conjunto de pertenencia o grupo, como se observa la muestra nro.2, con ponderación óptima 5,00

. Las variaciones ambientales, manejo del rodeo, pastoreo, humedad del suelo, ciclo de lluvias, producción y eficiencia, ciclo de alimentación, sanidad, genética y bienestar animal son componentes y los períodos de tiempo escogidos para cada análisis, son independientes de los resultados obtenidos. Si comparamos los resultados obtenidos en la muestra nro.2 con valor promedio óptimo de baja de 6,46 a 5,00. Un porcentaje que muestra la importancia del número de animales por hectárea, producción y eficiencia, que el productor tiene que agregar alimentos que proporcionen proteínas, que faciliten el rumen y no produzca dificultad gástrica o baja en la producción de leche, para sustituir y aumentar el contenido, para llegar al período de lactancia de las vacas de ordeñe, para evitar la merma, evitando pérdida de inversión significativa.

## 5. REFERENCIAS:

[1] Zadeth, L. (1994) “The Fuzzy Systems Handbook” NTA (2023) “Salud animal” A practitioner!s guide to building, using and Maintaining Fuzzy sistems EARL COX.

[2] Arredondo Vidal, T. (2014) “Introducción a la lógica difusa”.pdf

[3] Bonilla, R. M. 0. “Gestión de sostenibilidad utilizando Lógica Borrosa”. Universidad complutense Madrid.2010-2011.

[4] Lázzari, L. Machado, E. y Perez, R. H.(1999)”Teoría de la decisión Fuzzy”. Edic. Macchi Bs.As.

[5] Jeantet, G. R. Roingrait, M. y Brula,G. (2005) “Ingeniería de los procesos aplicada a la industria Láctea”. Edit.Acribia S.A.

[6] Keating, P.F. Gaona Rodriguez, H. (1999) “Introducción a la lactología” 2da. Edición. Edit. Limusa Pub. Noriega.

[7]Servicio Meteorológico de Trenque Lauquen. (2023) https://www.smn.gob.ar/ https://www.google.com/search?q=informes+de+servicio+meteorologico+nacional+para+trenque+lauquen&rlz=1C1CHZN_esAR1016AR1016&oq

[8] INTA (2023) “Salud animal” https://www.argentina.gob.ar/inta/tecnologias/salud-animal

**Agradecimiento:** Los autores de este trabajo agradecen al Depto. De Ingeniería Industrial Facultad Regional Trenque Lauquen–UTN.

A la colaboración y asesoramiento del Observatorio agropecuario del Departamento de la Licenciatura en Administración Rural de la Facultad Regional Trenque Lauquen- UTN.

Al grupo de trabajo de INTA Trenque Lauquen, por el asesoramiento y datos relevados para comparación en la industria Láctea 2024-2025.-

# RELEVAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN ORGANIZACIONAL DE COOPERATIVAS EN ROSARIO: UNA EXPERIENCIA METODOLÓGICA DESDE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL

Viri, Mariana; Toscano, Julieta; Mori, Carolina

*Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.*

*mviri@fceia.unr.edu.ar; jtoscano@fceia.unr.edu.ar; cmori@fceia.unr.edu.ar*

**RESUMEN**

Este trabajo presenta un enfoque metodológico orientado al relevamiento y análisis organizacional de cooperativas de trabajo del Departamento Rosario. Se enmarca en un Proyecto de Investigación radicado en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA), acreditado por la Universidad Nacional de Rosario (UNR), titulado "*Aportes de la Ingeniería Industrial para el desarrollo de la Economía Social y Solidaria: desafíos y oportunidades*".

La ponencia se centra en uno de los objetivos específicos del proyecto: reconocer y caracterizar a los actores de la Economía Social y Solidaria en la región, con especial atención a las cooperativas de trabajo, dado su mayor nivel de formalización, escala productiva y potencial de aplicación de herramientas técnicas.

La metodología se organizó en tres etapas: (1) un relevamiento inicial de cooperativas del Departamento Rosario a partir del padrón del INAES y otras fuentes públicas; (2) una delimitación sectorial enfocada en cooperativas de trabajo con actividad manufacturera en Rosario y el diseño de un cuestionario autogestionado para relevar variables organizativas y productivas; y (3) una etapa en desarrollo basada en entrevistas semiestructuradas para profundizar el diagnóstico organizacional.

Los resultados preliminares muestran una alta concentración de cooperativas en Rosario, predominando entre ellas las cooperativas de trabajo. Las principales actividades se vinculan a Servicios Personales, Construcción e Industria Manufacturera. Asimismo, se observó una marcada heterogeneidad en aspectos como el grado de formalización institucional y la disponibilidad de información pública. Lo relevado hasta el momento evidencia oportunidades para aplicar herramientas de la Ingeniería Industrial en mejora organizacional, diseño de estructuras funcionales y planificación estratégica.

Finalmente, se destaca la importancia de ampliar el campo de acción profesional hacia formas cooperativistas, favoreciendo una ingeniería con compromiso social y territorial. La experiencia aporta, además, una instancia de integración efectiva entre universidad pública y organizaciones sociales.

**Palabras Claves:** Ingeniería Industrial - Cooperativas de trabajo - Economía Social y Solidaria - Caracterización organizacional.

**ABSTRACT**

This paper presents a methodological approach aimed at the survey and organizational analysis of worker cooperatives in the Rosario Department. It is part of a research project based at the Faculty of Exact Sciences, Engineering, and Surveying (FCEIA), accredited by the National University of Rosario (UNR), entitled "Contributions of Industrial Engineering to the Development of the Social and Solidarity Economy: Challenges and Opportunities."

The presentation focuses on one of the project's specific objectives: to recognize and characterize the actors of the Social and Solidarity Economy in the region, with special attention to worker cooperatives, given their higher level of formalization, production scale, and potential for applying technical tools.

The methodology was organized into three stages: (1) an initial survey of cooperatives in the Rosario Department based on the INAES registry and other public sources; (2) a sectoral delimitation focused on worker cooperatives with manufacturing activity in Rosario and the design of a self-managed

questionnaire to collect organizational and productive variables; and (3) a development stage based on semi-structured interviews to deepen the organizational diagnosis.

Preliminary results show a high concentration of cooperatives in Rosario, with worker cooperatives predominating. Their main activities are related to Personal Services, Construction, and Manufacturing. Furthermore, marked heterogeneity was observed in aspects such as the degree of institutional formalization and the availability of public information. The findings to date reveal opportunities to apply industrial engineering tools to organizational improvement, functional structure design, and strategic planning.

Finally, the importance of expanding the professional field of action toward cooperative forms is highlighted, fostering engineering with social and territorial commitment. The experience also provides an opportunity for effective integration between public universities and social organizations.

**Keywords:** Industrial Engineering - Worker cooperatives - Social and Solidarity Economy - Organizational characterization.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Economía Social y Solidaria (ESS) constituye un campo en permanente construcción, que busca ofrecer alternativas al modelo económico mayoritario mediante prácticas basadas en la cooperación, la autogestión y la primacía de lo social por sobre el capital. Sus orígenes se remontan a experiencias históricas de apoyo mutuo y trueque, aunque la conceptualización moderna comenzó a tomar forma en el siglo XIX con la creación de cooperativas, asociaciones obreras y mutuales que surgieron como respuesta a necesidades no cubiertas por el mercado ni por el Estado (Novillo Martínez, 2015).

En el caso de Argentina, la ESS adquirió visibilidad en la década de 1970 y cobró un nuevo impulso a partir de la crisis económica y social de 2001 (Pastore, 2010). Actualmente, las organizaciones que la integran abarcan cooperativas, mutuales, microemprendimientos, empresas recuperadas por sus trabajadores, agricultura familiar, organizaciones de comercio justo y consumo responsable, y diversas asociaciones de la sociedad civil (Coraggio, 2020). Entre ellos, las cooperativas de trabajo destacan por su mayor nivel de formalización y escala productiva, así como por su capacidad para sostener el empleo y dinamizar la producción local.

El crecimiento de este sector genera la necesidad de fortalecer sus capacidades técnicas, productivas y organizacionales, abriendo un espacio de especial interés para la Ingeniería Industrial. Desde la definición de la profesión planteada por el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI, 2001), se reconoce la importancia de emplear el conocimiento científico y tecnológico en beneficio de la humanidad, en el marco de restricciones éticas, sociales y ambientales. En consecuencia, avanzar en la vinculación entre la Ingeniería Industrial y las organizaciones de la ESS no solo contribuye al fortalecimiento de estas últimas, sino que también amplía el horizonte profesional de los futuros egresados.

En concordancia con este enfoque, la Universidad Nacional de Rosario ha establecido nuevas políticas orientadas a vincular el conocimiento científico-tecnológico con las necesidades de la sociedad actual. La ordenanza N° 751/2021 dispone la incorporación de Prácticas Sociales Educativas en todas las carreras de pregrado y grado, junto con la existencia de espacios curriculares electivos vinculados a la participación en proyectos de investigación (UNR, Resolución N° 134, 2024) , favoreciendo, de esta manera, la integración entre la formación académica y las problemáticas del entorno. Estas iniciativas permiten consolidar perfiles profesionales capaces de responder a los desafíos sociales, ambientales y productivos de la región.

En este marco, el presente trabajo se inscribe en el proyecto de investigación titulado “Aportes de la Ingeniería Industrial para el desarrollo de la Economía Social y Solidaria: desafíos y oportunidades”, radicado en UNR, cuyo objetivo es generar y desarrollar intervenciones que integren herramientas tecnológicas y conceptos de la Ingeniería Industrial en una organización del ámbito de la Economía Social y Solidaria, con el fin de fomentar su crecimiento y desarrollo, respetando sus principios y valores.

De esta manera, el objetivo específico de este trabajo es exponer el proceso metodológico de relevamiento y caracterización organizacional de cooperativas en Rosario desde una perspectiva de la Ingeniería Industrial. Se busca describir el desarrollo de las etapas planificadas, presentar los avances alcanzados en aquellas que aún se encuentran en ejecución y mostrar los resultados obtenidos hasta el momento.

Asimismo, el trabajo procura visibilizar las oportunidades que ofrece este campo para la aplicación de herramientas propias de la Ingeniería Industrial, generando un aporte en el fortalecimiento de las cooperativas como actores económicos y sociales, y desarrollando, al mismo tiempo, un espacio de integración efectiva entre la universidad pública y las organizaciones de la ESS. En este sentido, la propuesta se orienta hacia el desarrollo de una ingeniería comprometida con la construcción de alternativas productivas más inclusivas y sostenibles, en sintonía con los desafíos contemporáneos.

## 2. METODOLOGÍA

El relevamiento se organizó en tres etapas sucesivas y complementarias, cada una con una población de estudio y objetivos específicos. Si bien fueron concebidas de manera secuencial, en la práctica se desarrollaron de forma dinámica y parcialmente superpuesta, lo que permitió actualizar y perfeccionar continuamente los resultados. Así, el proceso avanzó de un abordaje general hacia uno más focalizado, combinando herramientas metodológicas cada vez más precisas en coherencia con el carácter no lineal de la investigación. Un resumen de estas etapas se presenta en la Tabla 1.

*Tabla 1 – Resumen descriptivo de las etapas de relevamiento*

| | Universo | Herramienta de relevamiento | Objetivo |
|---|---|---|---|
| **Etapa 1** | ***Universo Grande (UG)*** Cooperativas del Depto. Rosario | **Base de datos** fuentes secundarias | Describir. Identificar. Clasificar. Establecer criterios de selección. |
| **Etapa 2** | ***Universo Mediano (UM)*** Cooperativas de trabajo de la Ciudad de Rosario con actividad económica C-Industria Manufacturera | **Cuestionario** Autogestionado | Ampliar la descripción. Profundizar la clasificación. Establecer criterios de selección. |
| **Etapa 3** | ***Universo Chico (UC)*** A definir | **Entrevistas** | Conocer en profundidad. Seleccionar las cooperativas a intervenir. |

### 2.1 Etapa 1

En la Etapa 1, la población de estudio se definió como las cooperativas regularmente constituidas conforme a la Ley N° 20.337 de Cooperativas (Argentina, 1973) y vigentes en el Dpto. Rosario al 20 de marzo de 2024, de acuerdo con el registro del Instituto Nacional de Asociativismo y Economía Social (INAES). A este conjunto se le denominó Universo Grande (UG).

Con el propósito de tener una perspectiva general de las cooperativas de Rosario y alrededores, así como identificar características que favorezcan la valoración del potencial de aplicación de herramientas de la Ingeniería Industrial, se elaboró una base de datos.

Cabe señalar que esta unidad de análisis no agota la totalidad de las organizaciones de la ESS. Sin embargo, la complejidad y diversidad de formas que adopta la ESS exigió acotar el relevamiento a las cooperativas, tanto por la restricción de recursos disponibles como por los objetivos específicos del Proyecto de Investigación. En este sentido, el nivel de organización y desarrollo, la envergadura, la escala de producción, el nivel tecnológico y la complejidad de los productos de este sector con forma jurídica definida, amplía las oportunidades para aplicar herramientas tecnológicas y conceptos de la Ingeniería Industrial. En cuanto a la delimitación geográfica, se consideró el Dpto. Rosario, que es el ámbito de referencia del Proyecto de Investigación en el que se enmarca este trabajo.

La base de datos se construyó inicialmente a partir del padrón del INAES, obtenido el 20 de marzo de 2024 mediante su buscador oficial (INAES, 2024a). Para ello, se aplicaron los filtros correspondientes a Padrón de “Cooperativas”, Provincia “Santa Fe”, Partido/Departamento. “Rosario”, Tipo de entidad “Cooperativas” y Estado “Vigente”. El padrón contenía información básica de cada entidad, como número de matrícula, CUIT, nombre, domicilio, fecha de inscripción y tipo de cooperativa. Esta clasificación se basa en el objeto de fundación y distingue los siguientes tipos: Trabajo, Consumo, Agropecuarias, Provisión, Seguros, Servicios Públicos, Vivienda y Construcción, Crédito, Federaciones y Confederaciones.

Un insumo fundamental para la clasificación y la posterior selección del subconjunto objeto de estudio en la Etapa 2 fue la identificación de la actividad económica principal de cada cooperativa. Para ello, se realizó una búsqueda manual en la página de la Administración Federal de Ingresos Públicos (AFIP), consultando la constancia de inscripción mediante el CUIT de cada identidad (AFIP, 2024). Este procedimiento no sólo permitió verificar la información disponible, sino también incorporar nuevos campos, entre los cuales resultó especialmente relevante el código del Clasificador de Actividades Económicas (CLAE). Dicho clasificador organiza las actividades en 21 grandes categorías (secciones), cada una de las cuales puede desagregarse en distintos niveles de apertura, lo que posibilita alcanzar un grado de especificidad suficiente para caracterizar en detalle las actividades económicas desarrolladas por las unidades analizadas (Alessandroni, 2013).

En los casos en que la información no se encontraba disponible en las fuentes primarias, se recurrió a la Dirección Provincial de Economía Social, Agricultura Familiar y Emprendedurismo, dependiente del

Ministerio de Desarrollo Productivo del Gobierno de la Provincia de Santa Fe. Esta dependencia facilitó una base de datos complementaria con descripciones textuales de actividades económicas, a las que se asignaron manualmente los códigos CLAE correspondientes.

Adicionalmente, el 25 de marzo de 2024 el INAES puso en marcha el Plan de Reordenamiento y Control del padrón de entidades, mediante las Resoluciones N.º 878/2024 y N.º 879/2024 (INAES, 2024b, 2024c). En ese marco, se intimó a cooperativas y mutuales con documentación pendiente a regularizar su situación, disponiéndose plazos y medidas que incluyeron la suspensión de entidades incumplidoras e incluso la revocación de la autorización para funcionar. Como consecuencia, el 4 de agosto del 2025, se realizó una actualización de la base de datos, respecto a los resultados de las nuevas normativas y criterios establecidos (Argentina, 2025).

### 2.2 Etapa 2

Sobre la base de la visión global obtenida en la Etapa 1, y atendiendo tanto al perfil profesional del Ingeniero Industrial como a los recursos disponibles y la accesibilidad al campo de estudio, se definió como población de análisis para la Etapa 2 a las cooperativas de trabajo radicadas en la ciudad de Rosario cuya actividad principal se encuentra clasificada en la Sección C – Industria Manufacturera del CLAE. Este conjunto fue denominado Universo Mediano (UM).

La selección se fundamenta en la estrecha relación que existe entre la actividad manufacturera y las herramientas de la Ingeniería Industrial. Este sector constituye un ámbito propicio para la aplicación interdisciplinaria de tecnologías, métodos y conceptos propios de la disciplina, orientados al diseño, implementación y mejora de procesos de producción. La industria manufacturera, al centrarse en la transformación de materias primas en productos con valor agregado, ofrece un terreno fértil para impulsar mejoras organizacionales, optimizar la utilización de recursos y generar bienes de mayor calidad y utilidad social.

Posteriormente, se llevó a cabo una investigación detallada de cada una de las cooperativas del UM, sin establecer contacto directo con ellas. El objetivo fue recopilar toda la información complementaria disponible en fuentes de acceso público para construir un perfil básico de cada organización. Para ello se consultaron múltiples canales, entre ellos redes sociales (Facebook, Instagram), páginas web institucionales, sitios de federaciones, portales de noticias y medios periodísticos, entre otros.

Como herramienta de relevamiento para este universo se diseñó un cuestionario autogestionado, destinado a relevar de manera sistemática variables relacionadas con el compromiso hacia los principios cooperativos, la disposición a procesos de fortalecimiento y el potencial de aplicación de herramientas de la Ingeniería Industrial. Para ello se tomó como referencia la *“Guía para el Mapeo y Relevamiento de la Economía Popular Solidaria en Latinoamérica y el Caribe”* (Coraggio et al., 2010).

Se proyecta realizar una prueba piloto con dos o tres cooperativas, aplicando el cuestionario de manera presencial. A partir de los ajustes derivados de esta experiencia, la versión definitiva será implementada en formato digital mediante Google Forms, y enviada al resto de las cooperativas por correo electrónico. Para favorecer la participación, el cuestionario estará acompañado de un material de introducción (ya sea en formato de texto o de video, a definir) en el que se dará a conocer al equipo de investigación, se explicará la finalidad del proyecto y se expondrán sus principales objetivos.

### 2.3 Etapa 3

Con el propósito de profundizar el conocimiento sobre las organizaciones y seleccionar aquellas cooperativas en las que se realizarán las intervenciones previstas para la etapa final del Proyecto de Investigación, se llevará a cabo un relevamiento en un número reducido de casos, que conformarán el denominado Universo Chico (UC). Este conjunto se definirá a partir de los resultados de la Etapa 2 (aplicación del cuestionario y análisis de resultados), los cuales brindarán la información necesaria para establecer los criterios de delimitación del Universo Mediano (UM) hacia el UC.

El instrumento de relevamiento seleccionado para esta etapa es la entrevista semiestructurada. Esta herramienta es una conversación dirigida con preguntas y respuestas, donde si bien se entabla una relación con alguien que probablemente sea un extraño, permite establecer confianza y entendimiento mutuo para así obtener las opiniones sinceras de los entrevistados y su parecer acerca del estado

actual del sistema, metas organizacionales y personales y procedimientos informales (Kendall & Kendall, 2005).

En paralelo con la conclusión de la Etapa 2, parte del equipo trabaja en la elaboración de la guía de entrevista. Este proceso se llevó a cabo a partir de la revisión de diversas fuentes bibliográficas sobre la conducción de entrevistas y la reflexión colectiva del equipo, lo que permitió consensuar los lineamientos generales y la organización en bloques temáticos.

Actualmente, se avanza en la elaboración de las preguntas específicas correspondientes a cada bloque temático. Además, se prevé la realización de un ensayo preliminar con una cooperativa externa a la muestra, seleccionada por su accesibilidad y disposición, con el fin de ajustar y validar la guía antes de su aplicación definitiva.

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos en cada etapa, que ofrecen una caracterización actualizada del cooperativismo en el Dpto. Rosario y constituyen la base para el diagnóstico organizacional más profundo previsto en la fase final del proyecto.

## 3. RESULTADOS

Los resultados del relevamiento facilitan la descripción de la situación actual de las cooperativas en el Dpto. Rosario, destacando su distribución territorial, las tipologías predominantes y los sectores de actividad más relevantes. La presentación se organiza de acuerdo con la secuencia metodológica definida: en primer lugar, se exponen los resultados de la Etapa 1 a partir del Universo Grande (UG); posteriormente, la caracterización del Universo Mediano (UM) en la Etapa 2 y la construcción del cuestionario; y por último, los avances preliminares de la Etapa 3, relacionados con la elaboración de la guía de entrevistas para el Universo Chico (UC).

En la **Etapa 1** se construyó y actualizó la base de datos correspondiente al Universo Grande (UG), integrado por las cooperativas del Dpto. Rosario vigentes al 20 de marzo de 2024 según el INAES. En una primera identificación se registraron 943 entidades, cifra que, tras el proceso de depuración y actualización al 4 de agosto de 2025, se redujo a 779 cooperativas activas. En este proceso, se pudo observar que de las 943 cooperativas iniciales, 733 (77.73%) continuaban vigentes, mientras que el resto cesaron su actividad de forma definitiva o temporal por diversos motivos, salvo dos que trasladaron su domicilio fuera del Departamento Rosario. La Tabla 2 muestra el detalle de los estados actualizados.

*Tabla 2. Estado actualizado de las cooperativas del Departamento Rosario.*

| Estado Actualizado | N° de cooperativas | Porcentaje de cooperativas |
|---|---|---|
| Vigente | 733 | 77,73% |
| Suspendida | 172 | 18,24% |
| Cancelada | 21 | 2,23% |
| Revoca Aut. | 11 | 1,17% |
| Retiro Aut. | 4 | 0,42% |
| Cambio Domicilio | 2 | 0,21% |
| **Total** | **943** | **100,00%** |

El análisis comparativo evidenció que la proporción de cooperativas que cesaron su actividad fue similar entre la ciudad de Rosario y el resto de las localidades del departamento: 21,53% de las cooperativas de Rosario dejaron de estar vigentes, frente al 26,05% en el resto de las localidades (Tabla 3). En cambio, al considerar el tipo de cooperativa, la diferencia fue más notoria: mientras el 23,5% de las cooperativas de trabajo cesaron su actividad, solo el 6,33% de las pertenecientes a otro tipo lo hicieron. Estas últimas corresponden a cinco entidades cuyo estado es “Suspendida” sin que ello implique un cese definitivo (Tabla 4).

*Tabla 3. Estado actualizado de las cooperativas según localidad.*

**Ciudad de Rosario**

| Estado Actualizado | N° de cooperativas | Porcentaje de cooperativas |
|---|---|---|
| Vigente | 645 | 78,47% |
| Suspendida | 144 | 17,52% |
| Cancelada | 19 | 2,31% |
| Revoca Aut. | 10 | 1,22% |
| Retiro Aut. | 4 | 0,49% |
| Cambio Domicilio | 2 | |
| Total | **824** | |

**Resto del Dpto. Rosario**

| Estado Actualizado | N° de cooperativas | Porcentaje de cooperativas |
|---|---|---|
| Vigente | 88 | 73,95% |
| Suspendida | 28 | 23,53% |
| Cancelada | 2 | 1,68% |
| Revoca Aut. | 1 | 0,84% |
| Total | **119** | |

*Tabla 4. Estado actualizado de las cooperativas según tipo.*

**Coop. de trabajo**

| Estado Actualizado | N° de cooperativas | Porcentaje de cooperativas |
|---|---|---|
| Vigente | 659 | 76,45% |
| Suspendida | 167 | 19,37% |
| Cancelada | 21 | 2,44% |
| Revoca Aut. | 11 | 1,28% |
| Retiro Aut. | 4 | 0,46% |
| Cambio Domicilio | 2 | |
| Total | **864** | |

**Coop. de otro tipo**

| Estado Actualizado | N° de cooperativas | | | Total | Porcentaje de cooperativas |
|---|---|---|---|---|---|
| | CONSUMO | PROVISIÓN | OTRO TIPO | | |
| Vigente | 5 | 17 | 52 | 74 | 93,67% |
| Suspendida | 1 | 4 | 0 | 5 | 6,33% |
| Total | 6 | 21 | 52 | **79** | |

En consecuencia, la base de datos actualizada al 4 de agosto de 2025, quedó constituida por 779 cooperativas vigentes: 733 que se mantenían en esa condición desde marzo de 2024; 40 nuevas constituidas posteriormente (todas de trabajo) y 6 que pasaron de estado “Suspendida” a “Vigente” al cumplir los requisitos exigidos (también todas de trabajo).

Un análisis descriptivo de esta base de datos actualizada muestra que casi el 88% de las cooperativas vigentes se localizan en la ciudad de Rosario, seguida a gran distancia por Villa Gobernador Gálvez, con apenas un 3,3%. En cuanto a la tipología, el predominio de las cooperativas de trabajo es aún más marcado, alcanzando un 90,5% del total departamental, mientras que las demás categorías no superan el 2,6% (Tabla 5).

*Tabla 5.Distribución de cooperativas actualmente vigentes según localidad y tipo.*

| Localidad | N° de cooperativas | Porcentaje de cooperativas |
|---|---|---|
| ROSARIO | 685 | 87,93% |
| VILLA GOBERNADOR GÁLVEZ | 26 | 3,34% |
| FUNES | 13 | 1,67% |
| ARROYO SECO | 7 | 0,90% |
| PUEBLO ESTHER | 7 | 0,90% |
| ALVAREZ | 6 | 0,77% |
| GENERAL LAGOS | 6 | 0,77% |
| PEREZ | 6 | 0,77% |
| GRANADERO BAIGORRIA | 5 | 0,64% |
| ZAVALLA | 5 | 0,64% |
| SOLDINI | 4 | 0,51% |
| CORONEL BOGADO | 3 | 0,39% |
| ALVEAR (SF) | 2 | 0,26% |
| IBARLUCEA | 2 | 0,26% |
| ACEBAL | 1 | 0,13% |
| VILLA AMELIA | 1 | 0,13% |
| **Total** | **779** | |

| Tipo de cooperativas | N° de cooperativas | Porcentaje de cooperativas |
|---|---|---|
| TRABAJO | 705 | 90,50% |
| SERVICIOS PÚBLICOS | 20 | 2,57% |
| DE PROVISIÓN | 19 | 2,44% |
| VIVIENDA Y CONSTRUCCIÓN | 12 | 1,54% |
| AGROPECUARIA | 10 | 1,28% |
| CONSUMO | 6 | 0,77% |
| FEDERACIONES - CONFEDERACIONES | 3 | 0,39% |
| CRÉDITO | 2 | 0,26% |
| DE SEGUROS | 2 | 0,26% |
| Total | **779** | |

Al comparar la distribución por tipo de cooperativas entre la ciudad de Rosario y el resto de las localidades del Departamento, se observa que en ambos casos predominan las cooperativas de trabajo, aunque con distinta magnitud: representan el 92,3% en Rosario y el 77,7% en las demás localidades. En cuanto a las segundas posiciones, se advierte una diferencia significativa: en el interior del departamento las cooperativas de servicios públicos alcanzan el 18,1%, mientras que en Rosario su participación es marginal (0,44%) (Tabla 6).

*Tabla 6. Distribución de cooperativas vigentes según tipo en: (a) Ciudad de Rosario y (b) resto del Dpto.*

(a)

| Tipo de cooperativas | N° de cooperativas | Porcentaje de cooperativas |
|---|---|---|
| TRABAJO | 632 | 92,26% |
| DE PROVISIÓN | 18 | 2,63% |
| VIVIENDA Y CONSTRUCCIÓN | 12 | 1,75% |
| AGROPECUARIA | 8 | 1,17% |
| CONSUMO | 5 | 0,73% |
| FEDERACIONES - CONFEDERACIONES | 3 | 0,44% |
| SERVICIOS PÚBLICOS | 3 | 0,44% |
| CRÉDITO | 2 | 0,29% |
| DE SEGUROS | 2 | 0,29% |
| Total | **685** | |

(b)

| Tipo de cooperativas | N° de cooperativas | Porcentaje de cooperativas |
|---|---|---|
| TRABAJO | 73 | 77,66% |
| SERVICIOS PÚBLICOS | 17 | 18,09% |
| AGROPECUARIA | 2 | 2,13% |
| CONSUMO | 1 | 1,06% |
| DE PROVISIÓN | 1 | 1,06% |
| Total | **94** | |

Estos resultados confirman una composición muy similar a la obtenida con la base de datos original (Viri et al., 2025).

Finalmente, al clasificar las 632 cooperativas de trabajo de Rosario según su actividad económica principal, se constató que en 12 casos no fue posible identificarla. Estas cooperativas no registraban actividad en AFIP (actual ARCA, Agencia de Recaudación y Control Aduanero), ya sea por ausencia de constancia de inscripción o por falta de impuestos activos y actividad declarada, ni figuraban en la base de datos de la Dirección Provincial de Economía Social. La Tabla 7 muestra la distribución resultante, donde se observa un predominio de los Servicios Personales y la Construcción, seguidos de la Industria Manufacturera, sector menor en términos relativos pero de especial interés para la Ingeniería Industrial por su potencial de optimización de procesos y generación de valor agregado.

*Tabla 7. Distribución de cooperativas de trabajo de la ciudad de Rosario actualmente vigentes según sección de actividad económica principal (CLAE).*

| Sección Actividad | N° de cooperativas | Porcentaje de cooperativas |
|---|---|---|
| S-SERVICIOS DE ASOCIACIONES Y SERVICIOS PERSONALES | 227 | 36,61% |
| F-CONSTRUCCIÓN | 190 | 30,65% |
| C-INDUSTRIA MANUFACTURERA | 45 | 7,26% |
| N-ACTIVIDADES ADMINISTRATIVAS Y SERVICIOS DE APOYO | 27 | 4,35% |
| E-SUMINISTRO DE AGUA; CLOACAS; GESTIÓN DE RESIDUOS Y RECUPERACIÓN DE MATERIALES Y SANEAMIENTO PÚBLICO | 25 | 4,03% |
| G-COMERCIO AL POR MAYOR Y AL POR MENOR; REPARACIÓN DE VEHÍCULOS AUTOMOTORES Y MOTOCICLETAS | 15 | 2,42% |
| M-SERVICIOS PROFESIONALES, CIENTÍFICOS Y TÉCNICOS | 15 | 2,42% |
| I-SERVICIOS DE ALOJAMIENTO Y SERVICIOS DE COMIDA | 13 | 2,10% |
| J-INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES | 12 | 1,94% |
| R-SERVICIOS ARTÍSTICOS, CULTURALES, DEPORTIVOS Y DE ESPARCIMIENTO | 12 | 1,94% |
| A-AGRICULTURA, GANADERÍA, CAZA, SILVICULTURA Y PESCA | 11 | 1,77% |
| P-ENSEÑANZA | 9 | 1,45% |
| Q-SALUD HUMANA Y SERVICIOS SOCIALES | 9 | 1,45% |
| H-SERVICIO DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO | 8 | 1,29% |
| L-SERVICIOS INMOBILIARIOS | 1 | 0,16% |
| O-ADMINISTRACIÓN PÚBLICA, DEFENSA Y SEGURIDAD SOCIAL OBLIGATORIA | 1 | 0,16% |
| No se identificó Sección | 12 | |
| Total | **632** | |

La **Etapa 2** delimitó un Universo Mediano (UM) compuesto por 45 cooperativas manufactureras radicadas en Rosario. El análisis de este universo propició la caracterización de la distribución de las cooperativas manufactureras según su actividad específica. Se observó un predominio del sector alimenticio (elaboración de bebidas, lácteos, comidas, pastas, entre otros), que concentra 22 cooperativas (49%). Le sigue el sector textil, con 11 cooperativas (27%). El resto se distribuye en rubros diversos como la fabricación de ladrillos, calzado, productos metálicos, de caucho, de plástico, entre otros.

Posteriormente, la investigación documental en fuentes públicas hizo posible la elaboración de perfiles organizacionales básicos, aunque con un alto grado de heterogeneidad. En algunos casos se logró reunir una cantidad considerable de información, incluyendo aspectos como la línea de productos, el número actual de socios, los apoyos recibidos (gubernamentales y no gubernamentales), la historia y el origen de la cooperativa, su pertenencia a federaciones o confederaciones, los destinatarios de la producción y diversas menciones en medios. En cambio, en

otras cooperativas la información disponible fue mucho más limitada, e incluso inexistente en determinados casos.

El cuestionario autogestionado diseñado inicia con los datos identificatorios de la cooperativa y continúa con 13 ítems estructurados en bloques temáticos definidos en función de los objetivos de la investigación:

- Grado de compromiso con los valores y principios cooperativos
  1. Origen de la cooperativa.
  2. Pertenencia a organizaciones de integración.
  3. Relación con otras cooperativas.
- Nivel de apertura a procesos de fortalecimiento externo
  4. Capacitaciones recibidas (tipo e institución que las dictó).
  5. Asistencia técnica recibida (tipo e institución que las brindó)
- Potencial de aplicación de herramientas de la Ingeniería Industrial
  6. Principales productos elaborados.
  7. Principales proveedores de materias primas e insumos.
  8. Principales clientes.
  9. Alcance de la actividad (local, regional, nacional o internacional).
  10. Mejoras implementadas en los últimos dos años.
  11. Organización del trabajo (roles y división de tareas).
  12. Dificultades en la producción.
  13. Dificultades en la comercialización.

La **Etapa 3**, actualmente en ejecución, contempla una nueva reducción del universo de análisis (Universo Chico, UC) y la aplicación de entrevistas semiestructuradas orientadas a profundizar el diagnóstico organizacional. Aunque las entrevistas aún no han sido implementadas, se avanzó en la definición de los siguientes bloques temáticos que guiarán la conversación:

- Historia y evolución de la cooperativa, considerando su desarrollo hasta la actualidad y su vínculo con la comunidad.
- Organización interna y estructura, con énfasis en el funcionamiento productivo.
- Vínculos con la universidad, explorando relaciones previas, colaboraciones y potenciales áreas de interacción.
- Dificultades y desafíos actuales, abordados de manera transversal a fin de identificar los principales retos que enfrenta la organización.

Asimismo, se definieron los criterios de coordinación de la entrevista, que incluyen: el primer contacto con la cooperativa y la presentación del equipo, los objetivos y la dinámica de trabajo; la descripción de las pautas y condiciones de participación; la importancia de la confidencialidad y la generación de confianza; la solicitud de un espacio adecuado y silencioso; la estimación del tiempo de duración; la consideración de la grabación de la entrevista; la notificación de que participarán dos integrantes del equipo; y la coordinación del día y la hora de realización.

Este instrumento facilita el análisis de dimensiones cualitativas relacionadas con la dinámica interna, los objetivos institucionales y las prácticas informales, aportando información clave para la selección final de las cooperativas en la que se llevarán a cabo las intervenciones proyectadas.

## 4. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado favoreció la puesta en marcha de una estrategia metodológica escalonada para el relevamiento y la caracterización de cooperativas, que se mostró adecuada para avanzar progresivamente desde un panorama general hacia un análisis más focalizado. Este diseño flexible, basado en la articulación de distintas fuentes y herramientas, ofrece un marco replicable para estudios en contextos donde la información es fragmentaria y los recursos son limitados.

Durante el proceso se identificaron desafíos relevantes, como la heterogeneidad en los grados de formalización institucional, las dificultades de acceso a información pública y la incidencia de cambios regulatorios en la vigencia de las entidades. Estas limitaciones refuerzan la necesidad de contar con metodologías dinámicas, capaces de integrar y actualizar datos de manera continua.

Desde la perspectiva disciplinar, la investigación confirma la pertinencia de la Ingeniería Industrial para contribuir al fortalecimiento de las cooperativas, especialmente en áreas vinculadas a la organización del trabajo, la mejora de procesos y la planificación estratégica. Ello amplía el horizonte profesional hacia ámbitos de la Economía Social y Solidaria, promoviendo un ejercicio de la ingeniería más comprometido con problemáticas sociales y territoriales.

Finalmente, la experiencia consolida la articulación entre la universidad pública y las organizaciones de la ESS, generando conocimiento aplicable y herramientas metodológicas transferibles a otros contextos. En esta dirección, el proceso emprendido constituye un antecedente valioso para el desarrollo de modelos de investigación con impacto social, capaces de integrar la producción académica con las demandas concretas de la comunidad.

## 5. REFERENCIAS


Administración Federal de Ingresos Públicos (AFIP). (2024). *Constancia de Inscripción.* https://seti.afip.gob.ar/padron-puc-constancia-internet/ConsultaConstanciaAction.do

Alessandroni, M. (2013). *El nuevo Clasificador de Actividades Económicas (CLAE) - Formulario 883*. Editorial Errepar. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, República Argentina.

Argentina. (1973). *Ley 20.337. Ley de Cooperativas*. Boletín Oficial de la República Argentina. https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-20337-31598

Argentina. (2025, 15 de enero). *El INAES dispuso la suspensión de 7.873 cooperativas y 417 mutuales*. Argentina.gob.ar. https://www.argentina.gob.ar/noticias/el-inaes-dispuso-la-suspension-de-7873-cooperativas-y-417-mutuales

CONFEDI (2001). *Estudio del vocablo Ingeniería*. Informe del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la República Argentina. Buenos Aires, Argentina.

Coraggio, J.L.; Arancibia, M.I.; Deux, M.V. (2010). *Guía para el Mapeo y Relevamiento de la Economía Popular Solidaria en Latinoamérica y Caribe.* Ediciones Nova Print S.A.C.

Coraggio, J.L. (2020). *Economía social y economía popular: Conceptos básicos.* Instituto Nacional de Asociativismo y Economía Social del Ministerio de Desarrollo Productivo, Argentina: Serie de Documentos N°1.

Instituto Nacional de Asociativismo y Economía Social (INAES) (2024a). *Padrón de entidades*. https://vpo3.inaes.gob.ar/Entidades/BuscarEntidades

Instituto Nacional de Asociativismo y Economía Social (INAES). (2024b). *Resolución 878/2024*. https://vpo3.inaes.gob.ar/normativas/resoluciones

Instituto Nacional de Asociativismo y Economía Social (INAES). (2024c). *Resolución 879/2024*. https://vpo3.inaes.gob.ar/normativas/resoluciones

Kendall, K. E., & Kendall, J. E. (2005). *Análisis y diseño de sistemas* (6ª ed.). Pearson Educación.

Novillo Martinez, Elena (2015). *La Economía Social y Solidaria: una economía para las personas.* Revista Economistas n°22, editada por el Consejo General de Economistas. Madrid, España.

Pastore, R. E. (2010). *Un panorama del resurgimiento de la economía social y solidaria en la Argentina.* Revista de ciencias sociales, 2(18), 47-74. Disponible en RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/1497

Universidad Nacional de Rosario (2021). Ordenanza N° 751. *Por la cual se establece la inclusión de Prácticas Sociales Educativas (PSE) en la formación de pregrado y grado de todas las unidades académicas.* Consejo Superior de la Universidad Nacional de Rosario.

Universidad Nacional de Rosario (2024). Resolución N° 134. *Por la cual se establece la incorporación al Plan de estudio de Ingeniería Industrial espacios curriculares electivos por la participación en Proyectos de Investigación.* Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.

Viri, M., Toscano, J., Bengoechea, B., & Rouillon, E. J. (2025). *Integración de la Ingeniería Industrial y la Economía Social y Solidaria: Un enfoque metodológico para el relevamiento y estudio de cooperativas en Rosario y alrededores*. En I. L. García (Comp.), *Actas de las XVI Jornadas Nacionales de Investigadorxs en Economías Regionales* (pp. 864–894). Dryes CEUR-CONICET.

# ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE UNA PLANTA DE ALIMENTO BALANCEADO: DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

Castiglioni, Federico [1]; Rossit, Diego [2]; Toncovich, Adrián [1]

*[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur.*
*[2] INMABB, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS)-CONICET.*
*federico.castiglioni@uns.edu.ar; diego.rossit@uns.edu.ar; atoncovi@uns.edu.ar*

**RESUMEN**

La Industria 4.0 ha transformado la manera en que se diseñan, planifican y optimizan los procesos industriales, incorporando tecnologías digitales que potencian la capacidad de análisis y decisión. En este contexto, la simulación se presenta como una herramienta estratégica para anticipar escenarios, evaluar alternativas y reducir los riesgos asociados a la operación productiva. Este trabajo desarrolla un modelo de simulación de eventos discretos aplicado a la empresa Agronegocios del Plata S.R.L., dedicada a la producción de alimento balanceado para mascotas en la ciudad de Coronel Pringles, Argentina. El objetivo es analizar el impacto de la incorporación de nuevo equipamiento sobre la capacidad de producción de la planta, en respuesta a la estrategia empresarial de triplicar su nivel de producción en el corto plazo. El modelo, construido a partir de los procesos reales de la planta, permite evaluar tanto la situación actual como el escenario futuro proyectado con los equipos adicionales. Los resultados obtenidos muestran que, bajo las condiciones actuales, la inversión planificada no es suficiente para alcanzar la meta de triplicar la producción, alcanzándose solamente un incremento de 2,5 veces respecto al nivel inicial. Este hallazgo sugiere la necesidad de considerar modificaciones adicionales en los procesos, la organización de recursos humanos y la estrategia de inversión. El estudio confirma la utilidad de la simulación como soporte a la toma de decisiones estratégicas en entornos industriales, ya que permite anticipar limitaciones, validar alternativas y reducir incertidumbre antes de realizar inversiones significativas. Asimismo, se identifican oportunidades de investigación futura vinculadas con la integración de gemelos digitales y la aplicación de enfoques de optimización multiobjetivo en la planificación de la capacidad productiva.

**Palabras Claves:** Simulación; Industria 4.0; Gemelos Digitales; Capacidad de Planta.

**ABSTRACT**

Industry 4.0 has reshaped the way industrial processes are designed, planned, and optimized by incorporating digital technologies that enhance analytical and decision-making capabilities. Within this framework, simulation emerges as a strategic tool to anticipate scenarios, evaluate alternatives, and mitigate risks associated with production systems. This study develops a discrete event simulation model applied to Agronegocios del Plata S.R.L., a pet food manufacturing company located in Coronel Pringles, Argentina. The objective is to assess the impact of incorporating new equipment on the plant's production capacity, as part of the company's strategy to triple its output in the near future. The model, built from the plant's real production processes, allows the evaluation of both the current situation and the projected scenario with additional equipment. Results indicate that, under current conditions, the planned investment would not suffice to achieve the intended tripling of production, reaching instead an increase of only 2.5 times the current output. This finding highlights the need for additional changes in processes, resource allocation, and investment strategy to accomplish the desired capacity expansion. The case study demonstrates the effectiveness of simulation as a decision-support tool in industrial contexts, as it enables organizations to anticipate constraints, validate alternatives, and reduce uncertainty prior to significant investments. Furthermore, future research opportunities arise from the integration of digital twins and the application of multi-objective optimization techniques to production capacity planning.

**Keywords:** Simulation; Industry 4.0; Digital Twins; Plant Capacity.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito empresarial y productivo, las decisiones deben tomarse en escenarios cada vez más complejos y cambiantes. Aunque la experiencia acumulada y el análisis de datos históricos aportan información útil, ambos resultan insuficientes para anticipar con precisión lo que sucederá en el futuro. Frente a esta limitación, la simulación computacional se ha consolidado como una herramienta esencial para proyectar el comportamiento de sistemas, procesos o componentes bajo diferentes condiciones, constituyendo un apoyo fundamental para la toma de decisiones (De Paula Ferreira et al., 2020).

La simulación se basa en la creación de un modelo digital que representa un sistema (por ejemplo, una cadena de suministro), un proceso (como la gestión de inventarios) o un componente físico (como un dispositivo mecánico). Dicho modelo permite reproducir su evolución en el tiempo, contemplando escenarios sujetos a variabilidad e incertidumbre. Su principal aporte radica en la posibilidad de explorar situaciones potenciales y anticipar resultados que no pueden observarse de manera inmediata (Soori et al., 2024).

En el contexto de la Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0), la simulación se complementa con tecnologías de sensorización, conectividad e inteligencia artificial, ampliando su alcance tanto en predicción como en prescripción. En particular, la articulación con los denominados gemelos digitales (digital twins) ofrece la capacidad de reflejar en tiempo real el estado de un sistema físico, así como de ensayar escenarios hipotéticos sin riesgo, retroalimentando las decisiones productivas (Javaid et al., 2023).

En esta línea, el presente trabajo propone un modelo de simulación de eventos discretos aplicado a la empresa Agronegocios del Plata S.R.L., con el objetivo de analizar el efecto de la incorporación de nuevos equipos en la capacidad productiva de su planta de alimento balanceado para mascotas.

## 2. LITERATURA RELACIONADA

El uso de simulación, particularmente la simulación por eventos discretos (SED), ha sido ampliamente documentado como herramienta para modelar, evaluar y optimizar procesos en los sectores alimentario y manufacturero. Javadi et al. (2023) mostraron que la simulación puede utilizarse para detectar y reducir cuellos de botella en líneas de producción, mejorando la eficiencia global del sistema y permitiendo probar escenarios alternativos sin incurrir en costos adicionales. De forma similar, Grenzfurtner et al. (2025) aplicaron SED en la producción de galletas, con el fin de equilibrar y reconfigurar líneas de trabajo, alcanzando mejoras significativas en la planificación y reducciones en los tiempos de inactividad.

La simulación también se ha empleado en la planificación de expansiones y en la incorporación de nuevos equipos. Hauder et al. (2020) analizaron problemas de programación multi-proyecto bajo restricciones de recursos, introduciendo flexibilidad en las actividades y demostrando cómo la combinación de modelos matemáticos y simulación puede ser un soporte clave en la gestión de entornos industriales complejos.

En paralelo, la integración de gemelos digitales ha modificado de manera sustancial la gestión del mantenimiento y el control predictivo. Zhong et al. (2023) desarrollaron un enfoque basado en gemelos digitales para mantenimiento predictivo, resaltando su capacidad de reflejar el estado real de los activos y anticipar fallas. Mrzyk et al. (2023) propusieron reutilizar arquitecturas de TI flexibles para implementar gemelos digitales de forma eficiente en distintos procesos. Estas aplicaciones, al combinarse con simulación, hacen posible ensayar escenarios, optimizar estrategias operativas y disminuir riesgos asociados a la producción.

Más recientemente, Loacker et al. (2024) aplicaron SED para estudiar cómo la reducción de cantidades mínimas de pedido afecta a la industria alimentaria, proponiendo contratos de ahorro compartido que equilibren costos de fabricación y beneficios de los minoristas. Por su parte, Abdurrahman (2025) presentó una revisión sobre el uso de gemelos digitales en el sector alimentario, destacando su aporte en mantenimiento predictivo y en la mejora de la eficiencia operativa.

En conjunto, la literatura evidencia que la combinación de simulación y gemelos digitales potencia la eficiencia operativa, mejora la planificación de recursos y brinda soporte a la toma de decisiones en distintos niveles de la industria alimentaria. Sobre esta base, el presente trabajo desarrolla un caso aplicado a Agronegocios del Plata S.R.L., evaluando el impacto de una estrategia de ampliación de equipamiento sobre la capacidad de producción de la planta.

## 3. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio se centra en Agronegocios del Plata S.R.L., una empresa ubicada en el parque industrial de Coronel Pringles, Provincia de Buenos Aires, Argentina, dedicada a la elaboración de alimento balanceado para mascotas. La localización de la planta resulta estratégica, dado que se sitúa entre la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y Bahía Blanca, lo que facilita la logística de distribución. Además, el parque industrial se encuentra sobre la Ruta Provincial N.º 51, que conecta ambas ciudades y permite un acceso directo a las instalaciones.

La producción se organiza bajo un esquema por lotes (*batch*) de 1000 kg, con un régimen continuo de 24 horas diarias distribuidas en tres turnos rotativos de 8 horas. Cada turno incluye un extrusorista, responsable de supervisar el proceso y asegurar la calidad del producto; un operario encargado de la dosificación de materias primas según la formulación correspondiente; y un equipo de tres operarios responsables del embolsado, paletizado, transporte interno del producto terminado y limpieza del área de trabajo.

El área de mantenimiento cuenta con cinco técnicos que trabajan en un horario fijo de lunes a sábado, complementado con un sistema de guardias para atender contingencias críticas fuera de dicho horario. Asimismo, el personal administrativo y el encargado de producción cumplen el mismo esquema horario que el equipo de mantenimiento.

Esta caracterización permite contextualizar el desarrollo del modelo de simulación y comprender los objetivos de mejora productiva planteados por la empresa a partir de nuevas inversiones en equipamiento adicional.

## 4. MODELO DE SIMULACIÓN

En esta sección se presenta el modelo de simulación desarrollado para el análisis, incluyendo una descripción detallada del sistema analizado, los supuestos considerados y los aspectos metodológicos vinculados a la implementación del modelo. El propósito de esta etapa es establecer una representación virtual del sistema productivo para evaluar su comportamiento en diferentes escenarios operativos.

La empresa objeto de estudio se encuentra actualmente en un proceso de expansión tecnológica orientado a la incorporación de nuevos equipos productivos, con el objetivo estratégico de triplicar su capacidad de producción. Este crecimiento proyectado requiere una planificación precisa que permita anticipar los posibles cuellos de botella, optimizar el uso de los recursos y garantizar la eficiencia del flujo de materiales. En este contexto, la simulación de eventos discretos se constituye como una herramienta de apoyo fundamental para la toma de decisiones, al posibilitar la experimentación virtual de configuraciones alternativas sin interferir con la operación real de la planta.

El modelo desarrollado tiene por finalidad analizar el rendimiento operativo actual del sistema y compararlo con los resultados esperados tras la implementación de la nueva infraestructura**.** De esta manera, se busca identificar las mejoras potenciales en los indicadores de desempeño, tales como la productividad, el tiempo de ciclo, el nivel de utilización de los recursos y la eficiencia global del sistema. Asimismo, el modelo permite explorar distintos escenarios de trabajo, evaluar el impacto de las variaciones en la demanda o en la dotación de personal, y proponer estrategias de optimización en la planificación de la producción.

La implementación del modelo se efectuó mediante el software Tecnomatix Plant Simulation (Siemens, 2025), una herramienta especializada en la simulación de eventos discretos que facilita la modelización de sistemas de manufactura complejos.

La construcción del modelo requirió la consideración del flujo de procesos de la planta y su disposición física mediante un layout representativo de las instalaciones.

### 4.1 Descripción general del sistema

El sistema productivo de Agronegocios del Plata S.R.L. se modeló bajo un enfoque de simulación de eventos discretos (SED), dado que la dinámica de la planta se caracteriza por procesos secuenciales, con recursos limitados y flujos de materiales que se transforman en puntos específicos del tiempo. La producción se organiza en lotes de 1000 kg, procesados de manera continua en turnos de 8 horas, con un régimen de operación de 24 horas diarias.

Según se indicó previamente, el modelo busca representar de manera virtual el comportamiento del sistema actual y el proyectado, considerando la incorporación de equipamiento adicional orientado a triplicar la capacidad productiva. La simulación permite identificar cuellos de botella, evaluar la utilización de recursos y analizar la eficiencia global del sistema ante distintos escenarios de operación.

### 4.2 Supuestos de modelización

Para la construcción del modelo se establecieron los siguientes supuestos:

- El flujo de materiales sigue la secuencia definida en el diagrama de procesos (Figura 1), desde la recepción de materias primas hasta el despacho del producto terminado.
- El tamaño de lote se mantiene constante en 1000 kg.
- La capacidad de la extrusora constituye el recurso crítico del sistema, condicionando el rendimiento global.
- No se consideran interrupciones por mantenimiento correctivo, paradas de limpieza, ni fallas imprevistas en esta primera versión del modelo.
- El personal asignado por turno (5 operarios) se mantiene constante en todos los escenarios.
- El horizonte de simulación corresponde a un turno de 8 horas, lo que permite comparar de manera homogénea los resultados entre escenarios.

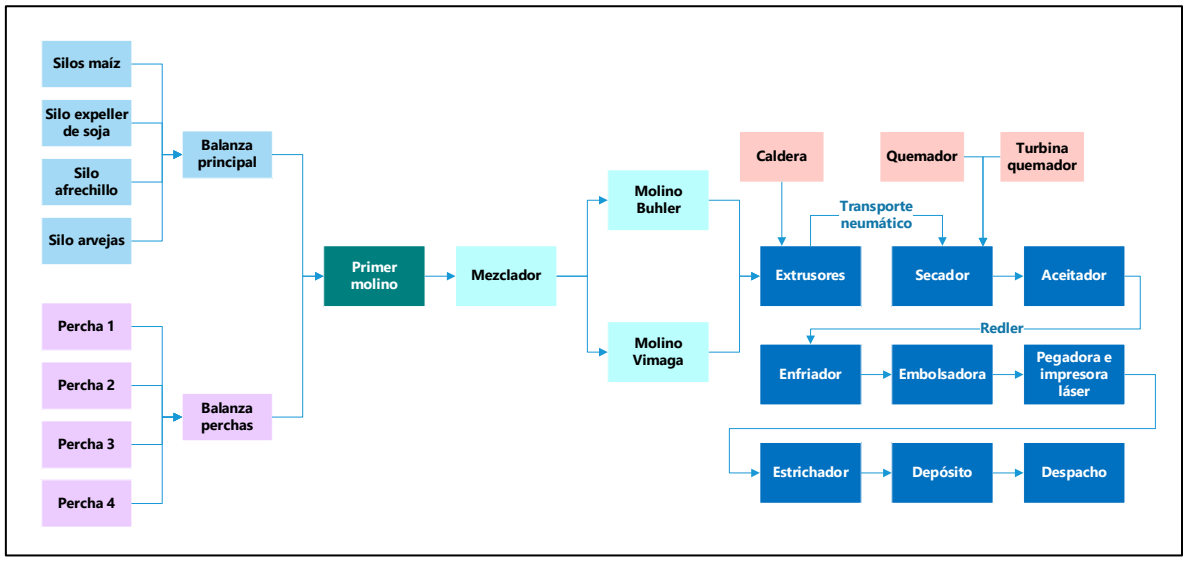



*Figura 1 Flujo de procesos de la planta.*

### 4.3 Aspectos metodológicos de la simulación de eventos discretos

La simulación de eventos discretos (SED) se fundamenta en la representación de un sistema como una secuencia de eventos que ocurren en instantes específicos del tiempo, modificando el estado del sistema. En este caso, los eventos corresponden a operaciones como:

- Inicio de dosificación de materias primas.
- Finalización de molienda.
- Inicio y fin de extrusión.
- Secado, enfriado y embolsado.
- Liberación de recursos (equipos y operarios).

El modelo fue desarrollado en Tecnomatix Plant Simulation (Siemens, 2025), siguiendo las etapas metodológicas clásicas de la SED:

1. Definición de objetivos
    - Evaluar el rendimiento actual del sistema.
    - Analizar el impacto de la incorporación de una extrusora de mayor capacidad.
    - Identificar cuellos de botella y proponer estrategias de optimización.
2. Formulación conceptual del modelo
    - Representación del flujo de materiales mediante diagramas de procesos (Figura 1).
    - Consideración del layout físico de la planta (Figura 2).
    - Identificación de recursos críticos: extrusora, secador, embolsadora y personal operativo.
3. Construcción del modelo computacional
    - Implementación de estaciones de trabajo (molienda, mezcla, extrusión, secado, enfriado, embolsado).
    - Definición de colas y buffers intermedios para representar acumulación de materiales.
    - Programación de reglas de asignación de recursos y prioridades de procesamiento.

    La Figura 3 presenta una vista esquemática del modelo tridimensional desarrollado, en la cual se pueden apreciar las principales áreas funcionales, los flujos de materiales y la interconexión entre los distintos procesos.
4. Validación y verificación
    - Comparación de los resultados de la simulación del sistema actual con los datos reales de producción (31 200 kg simulados vs. 35 000 kg reales).
    - Ajuste de parámetros hasta lograr una correspondencia aceptable entre el modelo y la operación real.
5. Experimentación y análisis de escenarios
    - Escenario base: capacidad de extrusora de 4000 kg/h.
    - Escenario proyectado: extrusora de 10 000 kg/h.
    - Evaluación de indicadores clave: productividad, utilización de recursos, tiempo de ciclo y eficiencia global.
6. Interpretación de resultados
    - Identificación de la extrusora como recurso limitante en el escenario actual.
    - Proyección de un incremento del 250 % en la capacidad con la nueva extrusora, aunque sin alcanzar la meta del 300 %.
    - Necesidad de evaluar procesos posteriores como potenciales cuellos de botella en escenarios de mayor demanda.

### 4.4 Parámetros de simulación

| Parámetro | Valor actual | Valor proyectado |
|---|---|---|
| Tamaño de lote | 1000 kg | 1000 kg |
| Capacidad extrusora | 4000 kg/h | 10 000 kg/h |
| Duración del turno | 8 h | 8 h |
| Personal por turno | 5 | 5 |

*Tabla 1 Parámetros de la simulación.*

### 4.5 Alcance y limitaciones

El modelo constituye una primera aproximación al sistema productivo, útil para la toma de decisiones estratégicas. Sin embargo, se reconocen limitaciones:

- No se incorporaron variabilidades estocásticas (fallas, mantenimientos, fluctuaciones de eficiencia).
- No se modelaron procesos auxiliares (logística interna, almacenamiento, despacho) con el mismo nivel de detalle.
- El horizonte de simulación se restringió a un turno, sin considerar efectos acumulativos en jornadas extendidas.

En etapas posteriores se prevé refinar el modelo incorporando distribuciones estadísticas de tiempos de operación, datos históricos de fallas y estrategias de mantenimiento preventivo, lo que permitirá alcanzar una representación más fiel del comportamiento real del sistema.

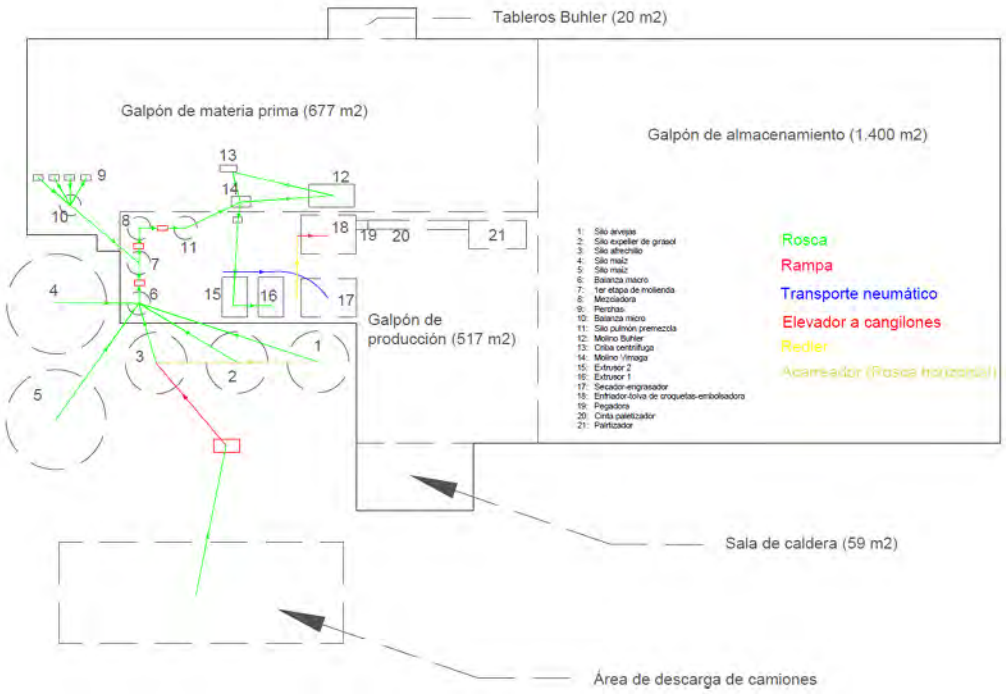



*Figura 2 Layout de la planta.*

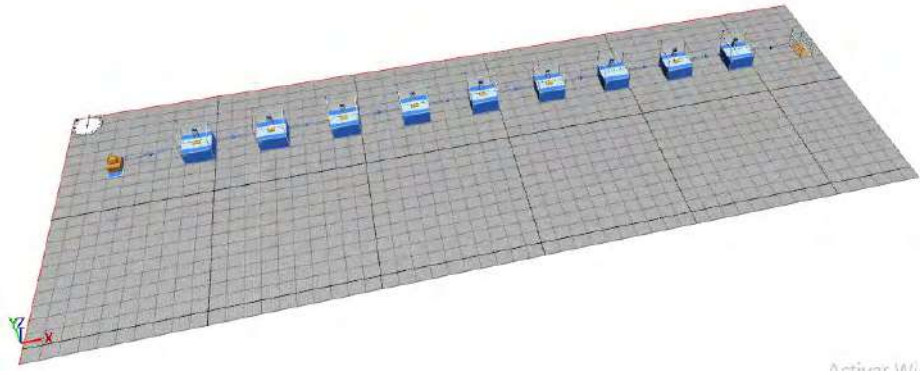


*Figura 3: Vista esquemática del modelo de simulación 3D.*

### 4.6 Indicadores de desempeño del sistema

Para evaluar el comportamiento del sistema productivo bajo los distintos escenarios simulados, se definieron indicadores clave de desempeño (Key Performance Indicators - KPI) que permiten cuantificar la eficiencia y efectividad de la operación. Estos indicadores se calcularon a partir de los resultados de la simulación y constituyen la base para la comparación entre el estado actual y el proyectado.

a) Productividad
Mide la cantidad de producto terminado generado en un horizonte de simulación.

$$Productividad\ (kg/h)\ =\ Producción\ total\ (kg)/Tiempo\ \ de\ simulación\ (h) \quad (1)$$

- Escenario actual: $31\ 200/8\ =\ 3900\ (kg/h)$
- Escenario proyectado: $79\ 100/8\ =\ 9887{,}5\ (kg/h)$

b) Utilización de recursos
Refleja el porcentaje de tiempo en que un recurso (máquina u operario) se encuentra efectivamente en uso respecto del tiempo total disponible.

$$Utilización\ (\%)\ =\ Tiempo\ en\ operación/Tiempo\ total\ disponible\ \times 100 \quad (2)$$

- En el escenario actual, la extrusora presenta una utilización cercana al 100 %, confirmando su rol como cuello de botella.
- En el escenario proyectado, la utilización de la extrusora disminuye, pero se incrementa la carga sobre procesos posteriores (secado, enfriado y embolsado).

c) Tiempo de ciclo
Corresponde al tiempo promedio requerido para procesar un lote de 1000 kg desde la dosificación de materias primas hasta el producto embolsado.

$$Tiempo\ de\ ciclo\ (h)\ =\ Tiempo\ total\ de\ procesamiento(h)/Número\ de\ lotes\ completados \quad (3)$$

- Escenario actual: mayor tiempo de ciclo debido a la limitación de la extrusora.
- Escenario proyectado: reducción significativa del tiempo de ciclo, aunque condicionado por la capacidad de los procesos de post-extrusión.

d) Eficiencia global del equipo (OEE)
El Overall Equipment Effectiveness (OEE) es un indicador integral que combina disponibilidad, rendimiento y calidad.

$$OEE\ =\ Disponibilidad \times Rendimiento \times Calidad \quad (4)$$

- Disponibilidad: proporción de tiempo en que el equipo está operativo respecto del tiempo planificado.
- Rendimiento: relación entre la producción real y la capacidad teórica.
- Calidad: porcentaje de producto conforme respecto del total producido.

En esta primera versión del modelo, se asumió $calidad\ =\ 100\ \%$ y disponibilidad plena, por lo que el OEE se aproxima al rendimiento. En futuras versiones se incorporarán datos de fallas, mantenimientos y rechazos de calidad para obtener un valor más realista.

e) Eficiencia global del sistema
Se define como la relación entre la producción obtenida y la producción objetivo establecida por la dirección de la empresa.

$$Eficiencia\ global\ (\%) = Producción\ obtenida/Producción\ objetivo \times 100 \quad (5)$$

- Escenario actual: $31\ 200/35\ 000 \times 100\ \cong\ 89{,}1\ \%$
- Escenario proyectado: $79\ 100/105\ 000 \times\ 100\ \cong\ 75{,}3\ \%$

Esto confirma que, si bien la inversión en la nueva extrusora mejora la capacidad, aún no se alcanza la meta de triplicar la producción.

### 4.7 Discusión metodológica

La incorporación de estos indicadores en el modelo de simulación permite:

- Comparar de manera objetiva el desempeño entre escenarios.
- Identificar recursos críticos y su nivel de utilización.

- Medir la brecha entre la capacidad instalada y la meta estratégica.
- Proveer información cuantitativa para la toma de decisiones de inversión y planificación.

Con el propósito de generar una base analítica sólida para futuros estudios se ha desarrollado el modelo presentado aquí, el cual representa una primera aproximación al sistema de producción de la empresa. Si bien el modelo actual permite obtener una comprensión inicial del comportamiento del sistema y evaluar escenarios de ampliación de capacidad, se reconoce que se trata de una versión preliminar que será progresivamente perfeccionada a medida que se disponga de información más precisa y se incorporen nuevos niveles de detalle. En etapas posteriores se prevé ajustar parámetros, ampliar la representación de los procesos auxiliares y refinar los mecanismos de control y gestión de recursos, con el objetivo de alcanzar una simulación de mayor fidelidad y utilidad para la planificación estratégica de la producción. Además, se recomienda enriquecer el modelo con distribuciones estadísticas de tiempos de operación, tasas de fallas y rechazos de calidad, lo que permitirá calcular indicadores más robustos como el OEE real y la variabilidad en la productividad.

## 5. RESULTADOS DETALLADOS DE LA SIMULACIÓN

Al ejecutar el modelo de simulación de la planta actual (Figura 4) podemos observar que el resultado obtenido es de 312 MU (cada MU representa 100 kg), lo cual equivale a 31 200 kg de alimento balanceado, siendo la producción real verificada de 35 000 kg (información brindada por la empresa).

Al ejecutar el modelo con la incorporación del nuevo equipamiento (Figura 5) obtenemos un resultado de 791 MU (79 100 kg), lo que significa un incremento de poco más del 250 %, no llegando a la meta establecida por la dirección de la empresa del 300 %.

La principal diferencia entre los dos estados se halla en la extrusora, con su capacidad actual de 4000 kg/h (Figura 4), lo cual genera la producción de 31 200 kg.

| Object | Working | Set-up | Waiting | Blocked | Powering up/down | Failed | Stopped | Paused | Unplanned | Portion |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Source | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 100.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| BalanzaDosif | 40.38% | 0.00% | 0.00% | 59.62% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Molino | 40.25% | 0.00% | 0.12% | 59.62% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Mezclador | 40.12% | 0.00% | 0.25% | 59.62% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| MolinoB | 40.00% | 0.00% | 0.38% | 59.62% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Extrusor | 99.50% | 0.00% | 0.50% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Secador | 52.96% | 0.00% | 47.04% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Aceitador | 56.14% | 0.00% | 43.86% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Enfriador | 56.05% | 0.00% | 43.95% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Embolsadora | 55.96% | 0.00% | 44.04% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Drain | 0.00% | 0.00% | 100.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |

Portions of the States

| Object | Number of Entries | Number of Exits | Minimum Contents | Maximum Contents | Relative Empty | Relative Full | Relative Occupation without Interruptions | Relative Occupation with Interruptions |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Source | 324 | 323 | 0 | 1 | 0.00% | - | 100.00% | 100.00% |
| BalanzaDosif | 323 | 322 | 0 | 1 | 0.00% | - | 100.00% | 100.00% |
| Molino | 322 | 321 | 0 | 1 | 0.12% | - | 99.88% | 99.88% |
| Mezclador | 321 | 320 | 0 | 1 | 0.25% | - | 99.75% | 99.75% |
| MolinoB | 320 | 319 | 0 | 1 | 0.38% | - | 99.62% | 99.62% |
| Extrusor | 319 | 318 | 0 | 1 | 0.50% | - | 99.50% | 99.50% |
| Secador | 318 | 317 | 0 | 1 | 47.04% | - | 52.96% | 52.96% |
| Aceitador | 317 | 317 | 0 | 1 | 43.86% | - | 56.14% | 56.14% |
| Enfriador | 317 | 316 | 0 | 1 | 43.95% | - | 56.05% | 56.05% |
| Embolsadora | 316 | 316 | 0 | 1 | 44.04% | - | 55.96% | 55.96% |
| Drain | 316 | 316 | 0 | 1 | 100.00% | - | 0.00% | 0.00% |

Material Flow Properties

| Object | Portion | Count | Sum | Mean Value | Standard Deviation |
|---|---|---|---|---|---|
| Source | 0.00% | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| BalanzaDosif | 40.38% | 323 | 3:13:48.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| Molino | 40.25% | 322 | 3:13:12.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| Mezclador | 40.12% | 321 | 3:12:36.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| MolinoB | 40.00% | 320 | 3:12:00.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| Extrusor | 99.50% | 319 | 7:57:36.0000 | 1:29.8307 | 3.0234 |
| Secador | 52.96% | 318 | 4:14:12.0000 | 47.9623 | 0.6729 |
| Aceitador | 56.14% | 317 | 4:29:27.0000 | 51.0000 | 0.0000 |
| Enfriador | 56.05% | 317 | 4:29:03.0000 | 50.9243 | 1.3480 |
| Embolsadora | 55.96% | 316 | 4:28:36.0000 | 51.0000 | 0.0000 |
| Drain | 0.00% | 316 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

Working Time

*Figura 4: Tablas de resultados de la simulación correspondiente al modelo de la instalación actual.*

Con su posterior reemplazo por una extrusora de 10 000 kg/h de capacidad (Figura 5) se obtienen los 79 100 kg de alimento, que muestra el modelo.

Cabe reiterar que los datos utilizados son aproximados y no contemplan variables que podrían afectar el rendimiento real, tales como interrupciones por mantenimiento correctivo, paradas de limpieza o fluctuaciones en la eficiencia operativa.

Se prevé en el futuro perfeccionar el modelo de simulación incorporando información más detallada, como, por ejemplo, los factores de variabilidad operativa antes mencionados, y evaluar ajustes en el plan de inversión para alcanzar el objetivo productivo propuesto.

| Object | Working | Set-up | Waiting | Blocked | Powering up/down | Failed | Stopped | Paused | Unplanned | Portion |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Source | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 100.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| BalanzaDosif | 100.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Molino | 99.88% | 0.00% | 0.12% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Mezclador | 99.75% | 0.00% | 0.25% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| MolinoB | 99.62% | 0.00% | 0.38% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Extrusor | 99.50% | 0.00% | 0.50% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Secador | 99.38% | 0.00% | 0.62% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Aceitador | 99.25% | 0.00% | 0.75% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Enfriador | 99.12% | 0.00% | 0.88% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Embolsadora | 99.00% | 0.00% | 1.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |
| Drain | 0.00% | 0.00% | 100.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |

Portions of the States

| Object | Number of Entries | Number of Exits | Minimum Contents | Maximum Contents | Relative Empty | Relative Full | Relative Occupation without Interruptions | Relative Occupation with Interruptions |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Source | 801 | 800 | 0 | 1 | 0.00% | - | 100.00% | 100.00% |
| BalanzaDosif | 800 | 799 | 0 | 1 | 0.00% | - | 100.00% | 100.00% |
| Molino | 799 | 798 | 0 | 1 | 0.12% | - | 99.88% | 99.88% |
| Mezclador | 798 | 797 | 0 | 1 | 0.25% | - | 99.75% | 99.75% |
| MolinoB | 797 | 796 | 0 | 1 | 0.38% | - | 99.62% | 99.62% |
| Extrusor | 796 | 795 | 0 | 1 | 0.50% | - | 99.50% | 99.50% |
| Secador | 795 | 794 | 0 | 1 | 0.62% | - | 99.38% | 99.38% |
| Aceitador | 794 | 793 | 0 | 1 | 0.75% | - | 99.25% | 99.25% |
| Enfriador | 793 | 792 | 0 | 1 | 0.88% | - | 99.12% | 99.12% |
| Embolsadora | 792 | 791 | 0 | 1 | 1.00% | - | 99.00% | 99.00% |
| Drain | 791 | 791 | 0 | 1 | 100.00% | - | 0.00% | 0.00% |

Material Flow Properties

| Object | Portion | Count | Sum | Mean Value | Standard Deviation |
|---|---|---|---|---|---|
| Source | 0.00% | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| BalanzaDosif | 100.00% | 800 | 8:00:00.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| Molino | 99.88% | 799 | 7:59:24.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| Mezclador | 99.75% | 798 | 7:58:48.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| MolinoB | 99.62% | 797 | 7:58:12.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| Extrusor | 99.50% | 796 | 7:57:36.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| Secador | 99.38% | 795 | 7:57:00.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| Aceitador | 99.25% | 794 | 7:56:24.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| Enfriador | 99.12% | 793 | 7:55:48.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| Embolsadora | 99.00% | 792 | 7:55:12.0000 | 36.0000 | 0.0000 |
| Drain | 0.00% | 791 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

Working Time

*Figura 5: Tablas de resultados de la simulación correspondiente al modelo de la instalación con incorporación de equipamiento adicional.*

## 6. RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS

A partir de los resultados obtenidos en la simulación y del análisis comparativo entre el escenario actual y el proyectado, se plantean las siguientes recomendaciones estratégicas para orientar el crecimiento de Agronegocios del Plata S.R.L. hacia la meta de triplicar su capacidad productiva.

### 6.1 Optimización de procesos productivos

- Revisión integral de la línea de post-extrusión: Con la incorporación de la nueva extrusora, los procesos de secado, enfriado, embolsado y almacenamiento se perfilan como potenciales cuellos de botella. Se recomienda evaluar inversiones complementarias en estas etapas para evitar que limiten el rendimiento global.

- Reducción de tiempos improductivos: Incorporar rutinas de mantenimiento preventivo y protocolos de limpieza planificada que minimicen paradas no programadas.
- Balance de cargas de trabajo: Ajustar la secuencia de operaciones y la asignación de recursos para mejorar la fluidez del flujo de materiales.

### 6.2 Gestión de recursos humanos

- Reestructuración de turnos y roles: Analizar la posibilidad de redistribuir funciones del personal operativo para maximizar la utilización de la capacidad instalada.
- Capacitación técnica: Fortalecer las competencias del personal en el manejo de la nueva maquinaria y en prácticas de mantenimiento autónomo.
- Flexibilidad operativa: Diseñar esquemas de trabajo que permitan responder a variaciones en la demanda sin comprometer la eficiencia.

### 6.3 Inversiones estratégicas

- Equipamiento complementario: Considerar la adquisición de un segundo secador o enfriador, así como sistemas automáticos de paletizado y almacenamiento, que acompañen el incremento de la capacidad de extrusión.
- Automatización y control: Incorporar sensores, tableros de control avanzados y sistemas de monitoreo en tiempo real para mejorar la trazabilidad y la eficiencia energética.
- Infraestructura logística: Evaluar la ampliación de áreas de almacenamiento y despacho para sostener el crecimiento proyectado.

### 6.4 Innovación y digitalización

- Simulación avanzada y optimización multiobjetivo: Integrar técnicas de optimización en el modelo de simulación para explorar configuraciones que equilibren productividad, costos y consumo energético.
- Gemelo digital: Avanzar hacia la implementación de un gemelo digital integral que permita la actualización continua del modelo, la simulación en tiempo real y la toma de decisiones prescriptivas.
- Industria 4.0: Incorporar tecnologías de automatización, IoT y análisis de datos para potenciar la competitividad y la sostenibilidad del sistema productivo.

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un modelo preliminar de simulación de eventos discretos destinado a analizar el desempeño productivo de la planta de Agronegocios del Plata S.R.L., con especial énfasis en los efectos de la incorporación de nueva maquinaria sobre la capacidad instalada. El análisis realizado demuestra que, bajo las condiciones actuales y considerando la inversión proyectada, la meta de triplicar la producción no resulta alcanzable, debido a restricciones vinculadas tanto a la configuración de los procesos como a la distribución de los recursos disponibles.

Los resultados obtenidos ponen de relieve el valor de la simulación como herramienta de apoyo a la planificación estratégica en entornos fabriles, ya que permite evaluar alternativas, anticipar resultados y reducir riesgos asociados a decisiones de inversión y modificaciones operativas. Asimismo, se destaca la conveniencia de avanzar hacia enfoques más sofisticados, como la implementación de gemelos digitales, que amplían las capacidades predictivas y prescriptivas en la gestión industrial.

El estudio permitió construir un modelo representativo del flujo productivo actual y proyectado de la empresa, a partir del cual se obtuvieron los siguientes aportes principales:

- Validación del modelo actual: La simulación de la situación base arrojó una producción de 31 200 kg por turno, valor cercano a los 35 000 kg reportados por la empresa. Esta concordancia

respalda la validez del modelo como herramienta de análisis, aun cuando se trata de una versión inicial con supuestos simplificadores.

- Impacto de la inversión en equipamiento: La incorporación de una extrusora de mayor capacidad (10 000 kg/h) permitió proyectar una producción de 79 100 kg por turno, lo que representa un incremento superior al 250 % respecto de la situación actual. Sin embargo, este resultado, aunque significativo, no alcanza el objetivo estratégico de triplicar la capacidad (300 %).
- Identificación de cuellos de botella: El análisis comparativo entre escenarios confirma que la extrusora constituye el recurso crítico del sistema. Su reemplazo genera un salto productivo relevante, pero también evidencia la necesidad de evaluar la capacidad de los procesos posteriores (secado, enfriado, embolsado y almacenamiento), que podrían convertirse en nuevas restricciones a medida que aumente el volumen procesado.
- Limitaciones del modelo: Los resultados deben interpretarse con cautela, dado que no se incorporaron factores de variabilidad operativa como paradas por mantenimiento, tiempos de limpieza, fluctuaciones en la eficiencia de los equipos o ausentismo del personal. La inclusión de estos elementos en futuras versiones permitirá obtener estimaciones más realistas del desempeño del sistema.
- Proyección de mejoras futuras: El modelo constituye una base sólida para la planificación estratégica de la producción. En etapas posteriores se recomienda:
    - Ampliar la representación de procesos auxiliares y logísticos.
    - Incorporar datos estadísticos de fallas, mantenimientos y variabilidad en la demanda.
    - Evaluar escenarios de reorganización del personal y turnos de trabajo.
    - Analizar la conveniencia de nuevas inversiones en equipos de post-extrusión y almacenamiento.

En síntesis, la simulación confirma que la empresa se encuentra en condiciones de incrementar de manera significativa su capacidad productiva mediante la inversión en equipamiento clave. No obstante, alcanzar la meta de triplicar la producción requerirá un abordaje integral que contemple tanto la ampliación de la capacidad instalada como la optimización de la gestión operativa.

De cara a próximos estudios, se propone enriquecer el modelo con información más precisa sobre indicadores de rendimiento, tiempos de inactividad y mantenimiento, lo que permitirá aumentar la exactitud de las simulaciones. También se considera prioritario explorar la reestructuración de turnos, la optimización de la secuencia productiva y una mejor asignación de personal, con el fin de potenciar la capacidad instalada. De manera complementaria, la combinación de la simulación con técnicas de optimización multiobjetivo abriría la posibilidad de diseñar estrategias de crecimiento más robustas y sostenibles. Finalmente, avanzar hacia la implementación de un gemelo digital integral permitiría la actualización continua del modelo y la toma de decisiones operativas en tiempo real, constituyendo un campo de gran proyección dentro del paradigma de la Industria 4.0.

## 8. REFERENCIAS


Abdurrahman, E. E. M., & Ferrari, G. (2025). Digital Twin applications in the food industry: a review. Frontiers in Sustainable Food Systems, 9, 1538375.

De Paula Ferreira, W., Armellini, F., & De Santa-Eulalia, L. A. (2020). Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. Computers & Industrial Engineering, 149, 106868.

Grenzfurtner, W., Tizghadam, P., & Gruchmann, T. (2025). Production line balancing and reconfiguration in the food industry. Procedia CIRP, 100, 123-128.

Javadi, S., Sadjadi, S., & Makui, A. (2023a). Identification and fixing bottlenecks of a food manufacturing line using discrete-event simulation. Scientific Reports, 13(1), 1234.

Javaid, M., Haleem, A., & Suman, R. (2023b). Digital twin applications toward industry 4.0: A review. Cognitive Robotics, 3, 71-92.

Loacker, P., Pöchtrager, S., & Fikar, C. (2025). Discrete-event simulation to analyse the impacts of a reduced minimum order quantity in the food industry: proposing a shared-savings contract. Journal of Simulation, 19(4), 367-380.

Mrzyk, P., Kubacki, J., Luttmer, J., Pluhnau, R., & Nagarajah, A. (2023). Digital Twins for predictive maintenance: A case study for a flexible IT-architecture. Procedia CIRP, 119, 152-157.

Siemens (2025). Tecnomatix Plant Simulation. Recuperado 22 de septiembre de 2025 de https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/plant-simulation-software/

Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2024). Virtual manufacturing in industry 4.0: A review. Data Science and Management, 7(1), 47-63.

Zhong, D., Xia, Z., Zhu, Y., & Duan, J. (2023). Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. Heliyon, 9(4).

**Agradecimientos**

Los autores agradecen a Alejandro Eguiluz y Silvio Arana, propietarios de la empresa Agronegocios del Plata S.R.L. y a Giuliano Maradeo, Ingeniero de planta, el suministro de la información requerida para el desarrollo de este trabajo.

Este trabajo fue financiado parcialmente por los proyectos de investigación PGI UNS 27/ZJ50 y PGI UNS 24/J096 de la Universidad Nacional del Sur.

# DESARROLLO DE UN ANALISIS ESTRUCTURAL DE LA PRODUCCION LECHERA

Moro, Héctor Javier; Díaz Evelyn; Xodo, Daniel

*Facultad Regional Trenque Lauquen, Universidad Tecnológica Nacional*
*Javier_moro@hotmail.com*

**RESUMEN**

La producción tambera es un pilar importante en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, por su aporte económico y por su impacto al desarrollo regional. En este contexto, el proyecto tiene como objetivo estudiar el comportamiento y la incidencia de variables que afectan a dicha actividad. La primera parte consistió en la identificación y análisis de las variables de estudio que incluyen: cantidad de producción, calidad de producción, raza, tipo de ordeñe (manual o mecánico), alimentación, control sanitario, vacunación, agua, lluvia, temperatura ambiente, vientos, radiación solar, manejo reproductivo (inseminación y monta natural), época de apareamiento y condición corporal al momento del parto. La segunda parte consistió en la realización de encuestas a productores y expertos de la cuenca lechera donde fueron analizados y consolidados en una matriz única. Donde se aplicó el método de Matriz de Impacto Cruzados Multiplicación Aplicada a una Clasificación (MICMAC), es una herramienta prospectiva que permite identificar y clasificar las variables en función de la Influencia y dependencia.

**Palabras Claves:** Producción Láctea, Variable Estructural, Micmac

**ABSTRACT**

Dairy production constitutes a key pillar in the Northwest of Buenos Aires Province, both for its economic contribution and its impact on regional development. Within this framework, the present project aims to analyze the behavior and incidence of variables that influence this activity. The first stage involved the identification and analysis of the study variables, which include: production volume, production quality, breed, type of milking (manual or mechanical), feeding practices, sanitary control, vaccination, water availability, rainfall, ambient temperature, wind, solar radiation, reproductive management (artificial insemination and natural mating), breeding season, and body condition at calving. The second stage consisted of conducting surveys with producers and experts from the dairy basin, whose results were analyzed and consolidated into a single matrix. Subsequently, the Cross-Impact Matrix Multiplication Applied to Classification (MICMAC) method was applied, a foresight tool that enables the identification and classification of variables according to their level of influence and dependence.

**Keywords:** dairy production, structural variable, Micmac.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Marco teórico

La producción lechera está asociada a una gran cantidad de variables, riesgos y condiciones de manejo de rodeo, alimentación del ganado bovino, ubicación geográfica, clima, suelo, recursos y la tecnología, que inciden y provocan pérdidas de tiempo, trabajo e inversión. Los factores incidentes tienen a su vez vinculación e interdependencia. de modo tal que sus variaciones podrán incidir de formas muy difíciles de anticipar.

Así por ejemplo diferentes razas suelen tener diferencias en su manejo optimo, los vientos modificaran sustancialmente el efecto de las precipitaciones sobre el suelo, el tipo de suelo también modifica el efecto de las lluvias y de ese modo diferentes factores pueden tener distinta incidencia sobre la producción

El análisis estructural MICMAC utiliza dos matrices: la Matriz de Impacto Cruzado (MIC) y la Matriz de Afectación Cruzada (MAC). La MIC muestra las relaciones directas entre las variables del sistema, mientras que la MAC revela las relaciones indirectas entre las variables al considerar el impacto acumulativo de las interacciones entre ellas. (García Reyes,2025)

El conocimiento de las relaciones de influencia y dependencia entre las variables permitirá formular propuestas orientadas a fortalecer la competitividad del mercado a largo plazo mediante la integración de tecnologías sostenibles y la implementación de políticas de gestión más efectivas. (Ortiz Gonzales, 2025)

La aplicación de análisis estructural permitirá conocer la influencia de las distintas variables en el sistema, a fin de focalizar la atención en aquellas de mayor relevancia para la producción láctea, y adoptar las decisiones apropiadas para mejorar la rentabilidad de la explotación.

La aplicación del modelo estructural MIC-MAC reveló una matriz profundamente interconectada de variables que influyen en la sensibilidad de la inversión, con distinciones claras que emergen entre factores impulsores, elementos dependientes y enlaces sistémicos. (Arabi, 2025)

El método de análisis fue elegido en razón de su versatilidad de aplicación a modelos complejos con gran cantidad de variables y factores incidentes, que van desde la climatología, las estrategias empresariales o modelos bélicos o de defensa aérea.

Es importante resaltar que el método MicMac – “Matriz de impactos cruzados y multiplicación aplicada para una clasificación” es una herramienta diseñada por Godet (2000), cuya función principal es facilitar la estructuración de ideas. En general, posibilita la descripción de un sistema / modelo, a partir del diligenciamiento de una matriz; orientada verticalmente a la descripción del grado de influencia y horizontalmente a la descripción del grado de dependencia de cada una de las variables dispuestas para el efecto” (Perez Uribe 2016)

La selección y enumeración de variables fue realizada mediante consulta a especialistas del sector y su ponderación mediante encuesta a productores de la zona, lo cual brindó los valores que luego fueron volcados en las matrices y el sistema de procesamiento.

En la producción láctea confluyen una multiplicidad de factores que inciden no tan solo en la cantidad y calidad de la leche sino también en el resultado económico de la actividad. Si bien algunas de las variables corresponden a factores naturales y pareciese que es imposible actuar sobre ellas, el empresario conociendo la incidencia de ellas podría diseñas estrategias que permitan mejorar el alcance de los objetivos.

En el sector son utilizados métodos estadísticos (descriptivos e inferenciales) y probabilísticos para analizar las variables que la afectan. Así por ejemplo los análisis de regresión, correlación, análisis factorial y otros son de utilidad para estudiar la vinculación entre las diversas variables concurrentes a través del tiempo. El proyecto complementó estos estudios con análisis estructural que permite describir un sistema mediante una matriz que relaciona los principales elementos participantes detectando cuales son las variables claves para el desarrollo de ese sistema. El Método Matriz de Impacto Cruzado Multiplicación Aplicada a una Clasificación (MicMac) evidencia la influencia que una variable tiene sobre otra. La primer parte del trabajo consistió en diseñar una encuesta en donde una muestra de productores respondieran de acuerdo a su expertiz la dependencia entre las variables que afectan en la producción lechera. Los factores consultados fueron: temperatura ambiente, radiación solar, vientos, lluvia, alimentación, calidad del agua, manejo reproductivo, control sanitario, raza, tipo de ordeñe, calidad de producción, cantidad de producción, condición corporal al momento del parto, vacunación y

época de parición. El perfil de los productores fue amplio encontrándose desde los pequeños hasta grandes empresas con ordeñe tradicional y automatizado de una amplia zona del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Luego se realizó el análisis estructural para determinar las variables motrices y dependientes que puedan ayudar a mejorar los escenarios previsibles, para tal efecto se utilizó el software MICMAC. Los resultados de las encuestas de opinión de expertos, sumado a los indicadores obtenidos del análisis estadístico permitirán categorizar y componer la matriz de análisis de relevancia de los indicadores. El objetivo principal del proyecto es obtener datos, relaciones y conocimiento sobre la actividad que puedan ser utilizados para la gestión de la misma en la explotación analizada y otras de similar entorno.

## 2. Procedimiento.

**2.1 Diseño de la encuesta a productores.** Para llevar a cabo este proceso se conjugó la lectura y análisis de la bibliografía en la materia en conjunto con el resultado de entrevistas previas con referentes de la lechería del noroeste de la provincia de buenos aires. El diseño final luego fue puesto a prueba y si bien se detectó que era extenso al momento de realizar el relevamiento, la importancia de todas las variables seleccionadas lo ameritaba.

**2.2 Selección de productores lecheros (expertos).** Para este ítem se trabajó con miembros de la Sociedad Rural de Trenque Lauquen y con docentes de la Carrera Lic. En administración Rural para poder contar con una muestra representativa no tan solo en la cantidad de casos evaluados sino en que los mismos fueran de diferente tamaño, localización y tipo de ordeñe.

**2.3 Realización de la encuesta.** Se mantuvo reuniones explicativas acerca de los alcances del proyecto y la importancia de una correcta interpretación y elaboración de la encuesta. En la misma ocasión se llevaron adelante los relevamientos.

**2.4 Procesamiento de la encuesta.** La información de relación de variables de cada una de todas las encuestas se compaginó en un solo resultado que fue utilizado como insumo del soft que realizaría el análisis estructural.

**2.5 Realización del análisis estructural.** Se cargó en el software Micmac toda la información resultado del procesamiento de la encuesta para que el mismo elaborara los informes y gráficas.

**2.6 Análisis e interpretación de resultados.** Los resultados obtenidos fueron analizados por el equipo de investigación y puestos a consideración de algunos de los expertos de mayor trayectoria en la materia lechera. De allí surgieron algunos “ruidos” en cuanto a la ubicación de algunas variables (grado de dependencia – influencia).

**2.7 Análisis de Coherencia.** Producto de lo expuesto en el punto anterior se decidió corroborar los resultados obtenidos con Inteligencia Artificial encontrándose opiniones similares.

## 3. Resultados obtenidos.

La Figura 1 Mapa de influencia/dependencia directa, muestra el resultado arrojado por el procesamiento del Software, el que dará pie a nuestro análisis de importancia de variables. En el eje de las ordenadas (y) se encuentra representado el grado de influencia y en el de las abscisas (x) el grado de dependencia de una variable.

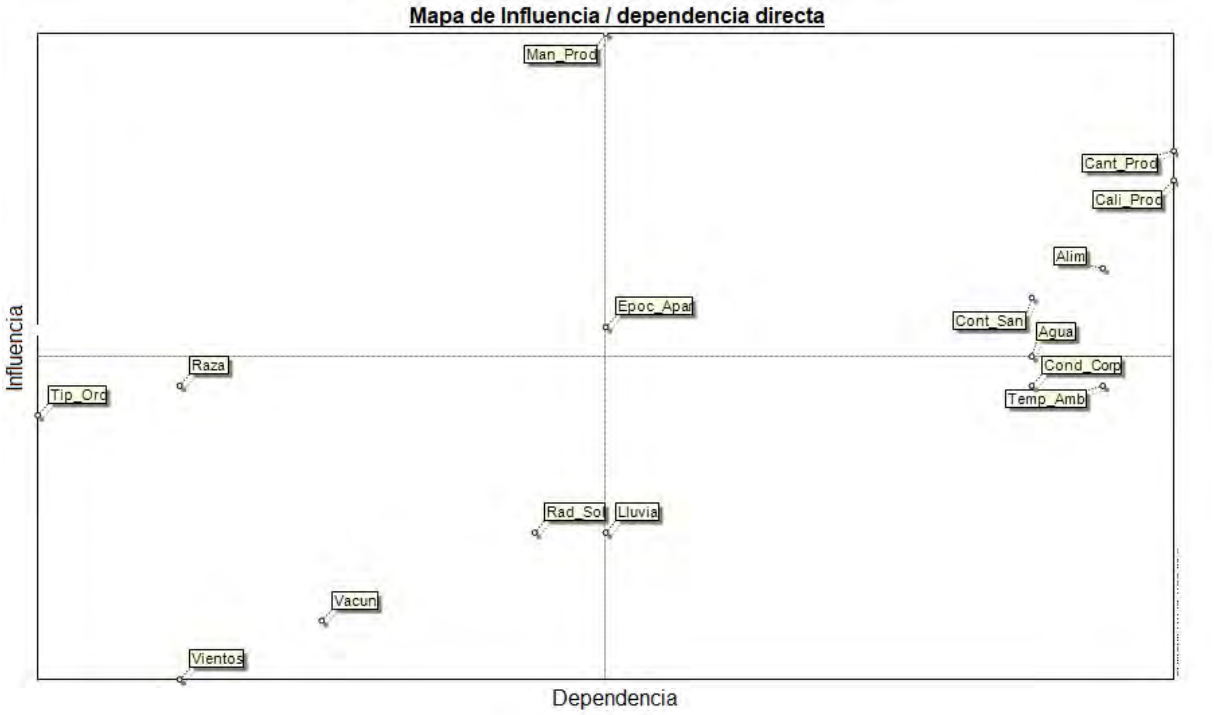



*Figura 1 Mapa de Influencia/dependencia directa.*

En la Figura 2 Interpretación de variables podemos observar 8 tipos de variables de acuerdo al resultado obtenido por el software del análisis MICMAC. El análisis de la investigación de acuerdo a las categorías definidas por el método MICMAC Godet (2001) es el siguiente:

**Variables de Entrada.** Este tipo de variables situadas en la zona superior izquierda del gráfico, poseen alta influencia y baja dependencia. Son variables que representan el motor del sistema marcando su grado de avance. Como se puede distinguir claramente no hay representada en este sector ninguna variable lo que evidenciaría alguna falla de interpretación por parte de los expertos o bien otras causas a investigar con posterioridad.

**Variables Claves.** Son variables ubicadas en el sector superior derecho del gráfico. Poseen alta influencia y mucha dependencia. Estas variables son las responsables de gestar el funcionamiento del propio sistema. Aquí encontramos:

- Cantidad de Producción (Cant_Prod)
- Calidad de Producción (Cal_Prod)
- Alimentación (Alim).

**Variables de Entorno.** Situadas en la zona media de influencia y con escasa dependencia, estas variables no harían contribución diferencial al desarrollo del sistema. Encontramos aquí:

- Raza.
- Tipo de Ordeñe (Tip_Ord)

**Variables de Regulación.** Estas variables ubicadas en la zona central del gráfico, con influencia media y dependencia media. Son transcendentales para el logro de las variables claves como Calidad de la Producción (Cal_Prod) y Cantidad de Producción (Cant_Prod). Aquí encontramos a:

- Época de Apareamiento (Epoc_Apar)

**Variables Objetivo.** Situadas en la zona de media influencia y alta dependencia. Son medianamente motrices y sobre ellas se pueden tomar decisiones para mejorar su evolución en pos de alcanzar las variables claves. Aquí encontramos dos que es muy coherente su ubicación:

- Control Sanitario (Cont_San)
- Condición Corporal (Cond_Corp)

Pero también aparecen aquí Temperatura y Agua cuestiones ambientales en donde está altamente limitada su manipulación.

**Variables Autónomas.** Este tipo de variables se encuentran en la zona inferior izquierda del gráfico representando poca influencia y poca dependencia en el sistema. No determinan el futuro del sistema y encontramos:

- Vientos
- Vacunación (Vacun).

**Palancas Secundarias.** Situadas en la zona baja de influencia y media de dependencia nos indican que la toma de decisiones sobre ellas permitiría hacer evolucionar a las Variables de Regulación. Poseen relativa importancia en el funcionamiento del sistema, pero pueden apalancar a otras variables como las reguladoras incidiendo así en el funcionamiento final. Se distinguen aquí:

- Radiación Solar (Rad_Sol)
- Lluvias.

**Variables de Salida o de Resultado.** Este tipo de variables se sitúan en la zona inferior derecha de la gráfica demostrando baja influencia y alta dependencia. No se tiene injerencia directa sobre ellas. En nuestra investigación no hallamos representación.

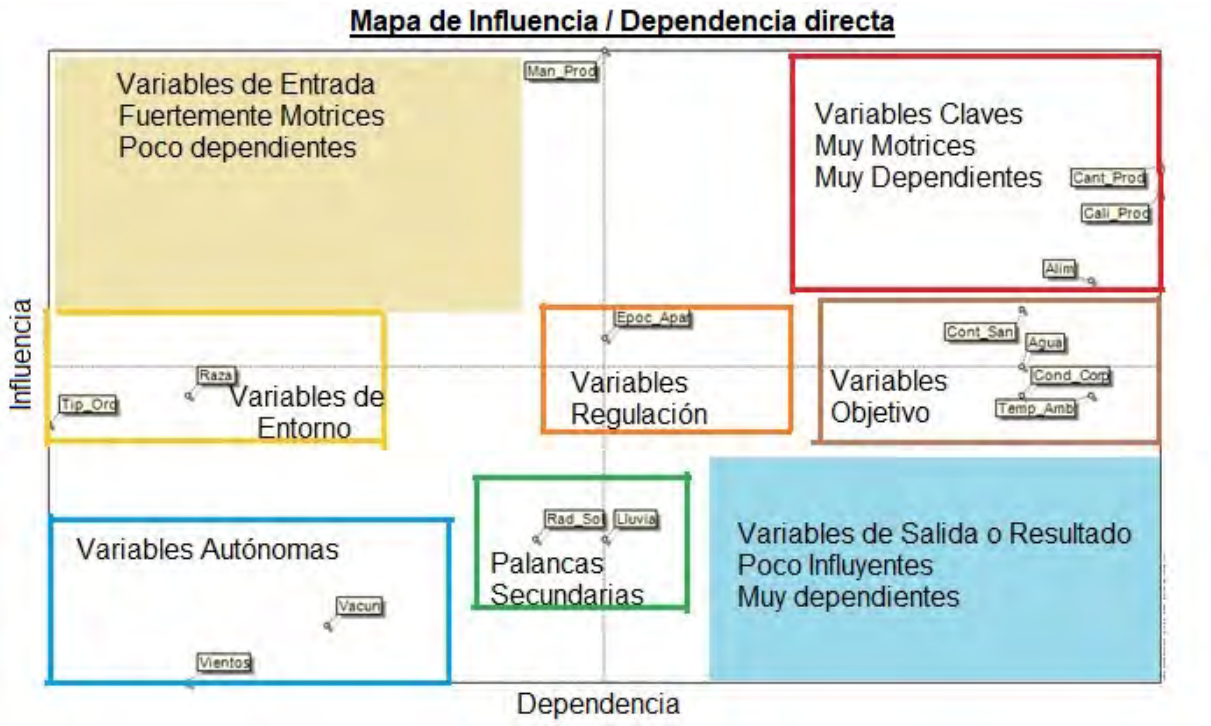



*Figura 2 Interpretación de Variables*

### 3.1 Análisis de coherencia del gráfico.

Al hallarse algunos puntos discutibles en el resultado del análisis se decidió hacer uso de la herramienta de inteligencia artificial para analizar la coherencia de los resultados. Los resultados fueron los siguientes:

3.1.1 Manejo reproductivo (Man_Prod). Ubicado en la zona de alta influencia y baja dependencia es coherente, ya que el manejo impacta directamente en la alimentación, sanidad, producción y bienestar animal, y no depende tanto de factores externos.

3.1.2 Producción (Cant_Prod y Cali_Prod). Están en el cuadrante de alta dependencia y alta influencia, esto es razonable, porque la cantidad y calidad dependen de alimentación, agua, genética, clima y manejo, pero a la vez repercuten en la sostenibilidad económica del tambo (influyen en la toma de decisiones).

3.1.3 Alimentación (Alim) y Agua. También en el grupo de alta influencia y dependencia, pero según nuestro análisis la Alimentación debería tener más influencia que dependencia, porque es un factor manejable (decisiones del productor sobre dieta, suplementación). El Agua sí puede tener alta dependencia (del ambiente y disponibilidad), pero su influencia es enorme sobre la producción por ello estimamos que debería estar más arriba en el eje de influencia.

3.1.4 Control Sanitario (Cont_San). Ubicado en alta dependencia e influencia, porque dependen de manejo, clima y disponibilidad de recursos, pero a su vez afectan fuertemente la productividad.

3.1.5 Época de apareamiento (Épo c_Apa). En la gráfica la vemos ubicada en zona de cierta influencia y baja dependencia siendo esto de dudosa veracidad ya que la época de partos depende mucho del manejo reproductivo y a su vez condiciona fuertemente la producción a lo largo del año. Debería estar más cerca de la zona de alta dependencia.

3.1.6 Radiación solar (Rad_Sol) y Lluvia. La radiación solar y la lluvia indicadas con baja influencia y dependencia están sobrevaloradas debido a que tienen muchísima importancia en la disponibilidad de forraje. Deberían tener más influencia.

3.1.7 En cuanto a la temperatura de ambiente (Temp_Amb) es muy coherente su ubicación ya que afecta la producción debido al estrés calórico y depende de factores externos de nulo control.

3.1.8 Vientos está muy bajo en ambos ejes, lo cual es lógico porque no suele ser un factor clave en la producción lechera.

3.1.9 Raza y Tipo de ordeñe (Tip_Ord). Aparecen con baja influencia y dependencia. La Raza o genética debería tener más influencia ya que determina el potencial de producción y la calidad de la leche. Tipo de ordeñe también influye en el control sanitario. Quizás ambas variables están subvaloradas en el modelo.

3.1.10 Vacunación (Vacun) Esta variable con baja influencia y dependencia genera la duda que no esté valorada por debajo de su potencial ya que tiene alta relevancia en la sanidad y en el manejo reproductivo.

## 4. CONCLUSIONES.

Luego del análisis se puede detectar que el manejo reproductivo de los animales es el motor de la actividad. Su correcta planificación y ejecución permitirán optimizar el resultado técnico y económico de la actividad. En segundo lugar de importancia se encuentra la calidad y cantidad de producción junto con la alimentación por lo que el monitoreo cotidiano resulta de suma importancia por la intensidad de la interacción estas variables con otras del sistema.

La herramienta de análisis estructural refleja las interacciones entre las variables más influyentes en la producción láctea y brinda un panorama en el cual el productor lechero puede interpretar su importancia y planificar acciones concretas en consecuencia de ello. Podemos concluir que este tipo de estudios es pertinente a la actividad a pesar que algunas variables hayan sido sobre valoradas encontrándose en lugares diferentes a los esperados por los investigadores. Esta desviación coincide llamativamente en los últimos ítems del relevamiento a productores. Debido a lo extenso del cuestionario, los valores atribuidos a las relaciones de las variables pueden haber sido influenciados por el cansancio y/o la mala interpretación.

Los resultados alcanzados fueron suministrados en una primera instancia a los Productores Lácteos que participaron en la investigación quienes manifestaron de la importancia de su conocimiento para realizar su planificación estratégica. Posteriormente se hará extensivo el resultado a asociación de productores y cámaras del sector.

## 5. REFERENCIAS.


Arabi, N. (2025). A MIC-MAC-based structural exploration of determinants impacting investment sensitivity. *International Journal of Innovative Science and Research Technology, 10*(4). https://doi.org/10.38124/ijisrt/25apr2226

Carreras Viviana, F. M. (s.f.). *Ministerio de Economía de la Nación - Secretaría de Asuntos Estratégicos*. Obtenido de Análisis de impactos cruzados en estudios prospectivos: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/metodologia_mic_mac_web_30-11-23.pdf.

García Reyes. (2025). *Doctorado en innovación en tecnología educativa: Modelo basado en análisis estructural para mejorar la calidad educativa de los programas educativos virtuales del TecNM Campus Villahermosa* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática]. Creative Commons. https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

Godet M. (2001) Manual de prospectiva estratégica, Dunod, Paris: Dunod.

Godet, M (2007). La Caja de Herramientas de la prospectiva estratégica. España. Laboratorio de investigación en prospectiva estratégica, CNAM, Paris, Instituto Europeo de Prospectiva estratégica.

Gutierrez, D. M. (Octubre de 2023). *Análisis Estructural*. Obtenido de Centro de Estudios - Universidad Nacional de Cuyo.

Ortiz Gonzales. (2025). *Transformación tecnológica sostenible de la cadena de valor en una plaza de mercado: Un estudio de caso*. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. https://doi.org/10.26507/paper.4407

Pérez Uribe, R. I., & Vargas, H. A. (2016). El uso del método MICMAC, para la definición de procesos de intervención en las organizaciones. *Ciencia y Poder Aéreo, 11*(1), 92–185. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=673571174008

Pérez, X. A. (s.f.). *Metodo de Análisis Estructural: Matriz de impactos cruzados multiplicación aplicada a una clasificación (MICMAC).* Universidad Autónoma de Nuevo León.

Rincón González, S., & Mujica Chirinos, N. (2004 de Abril - Junio de 26). Estudio prospectivo de la gestión tecnológica en las empresas del sector metalmecánico del estado Zulia. *Revista Venezolana de Gerencia (RVG)*, págs. vol. 9, núm. 26.

# De la retórica a la transformación: sostenibilidad, legitimación organizacional y cambio cultural en el discurso empresarial

Meretta Javier*, Bárbaro Laura, García Tomás.

*Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional*

*Grupo de investigación en tecnología de las organizaciones GITO.*
*Colon 332, 2900 San Nicolás*

*jmeretta@frsn.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

El presente artículo expone avances de una investigación en curso desarrollada por el Grupo de Investigación en Tecnología de las Organizaciones (GITO), orientada al análisis de la retórica ambiental en informes corporativos. En esta instancia se examina el informe de sostenibilidad 2024 de una empresa del sector metalúrgico argentino, con el propósito de comprender cómo se comunican y legitiman las estrategias ambientales.

La investigación se inscribe en un enfoque cualitativo, con diseño de estudio de casos múltiples y muestreo intencional. Se seleccionaron organizaciones con certificaciones ambientales o declaraciones públicas de compromiso con la sostenibilidad. La recolección de datos se realizó mediante análisis documental de informes corporativos, páginas web y comunicados oficiales. El procedimiento incluyó una lectura y codificación manual de fragmentos clave, complementada con el uso de ChatGPT para enriquecer la interpretación y con Voyant Tools para profundizar en el análisis léxico, detectar patrones de frecuencia y coocurrencia, y robustecer los hallazgos. El marco de análisis adoptado es el de legitimidad organizacional de Suchman (1995), que distingue entre legitimidad pragmática, moral y cognitiva.

El estudio revela que la sostenibilidad se presenta como un recurso estratégico para reforzar reputación y confianza externa, subordinada a la lógica de la competitividad. Si bien el informe proyecta una imagen de compromiso, las metas relativas, la ausencia de autocrítica y la omisión de tensiones estructurales sugieren que la sostenibilidad funciona más como estrategia de legitimidad que como transformación profunda.

**Palabras claves: Sostenibilidad corporativa, Legitimidad organizacional, Discurso ambiental**

**ABSTRACT**

This article presents partial results of an ongoing research project conducted by the Research Group on Technology of Organizations (GITO), focused on analyzing environmental rhetoric in corporate sustainability reports. In this instance, the 2024 sustainability report of a metallurgical company in Argentina is examined, with the aim of understanding how environmental strategies are communicated and legitimized.

The research follows a qualitative approach, using a multiple-case study design and purposive sampling. Organizations with environmental certifications or public declarations of commitment to sustainability were selected. Data collection was based on documentary analysis of corporate reports, websites, and official communications. The procedure included manual reading and coding of key fragments, complemented by the use of ChatGPT to refine thematic coding and enrich interpretation, and Voyant Tools to conduct a deeper lexical analysis, detect frequency and co-occurrence patterns, and strengthen findings. The analytical framework adopted is Suchman's (1995) theory of organizational legitimacy, which distinguishes between pragmatic, moral, and cognitive legitimacy.

The study reveals that sustainability is presented as a strategic resource to reinforce reputation and external trust, while remaining subordinated to business competitiveness. Although the report

conveys an image of environmental commitment, the reliance on relative targets, lack of self-criticism, and omission of structural challenges suggest that sustainability operates more as a strategy of legitimacy than as a true transformative project.

**Keywords:** Corporate sustainability, Organizational legitimacy, Environmental discourse

## 1. INTRODUCCIÓN

En el presente artículo se presenta información parcial del avance de un trabajo que analiza la retórica ambiental de las organizaciones realizado por el Grupo de Investigación en Tecnología de las Organizaciones (GITO). En esta oportunidad se presenta el análisis del informe de sostenibilidad de una empresa metalúrgica argentina. A fin de facilitar su lectura se mencionan algunos conceptos del tema.

Para comprender el concepto de sostenibilidad se puede pensar en una visión integrada de las dimensiones económica, ambiental y social en una organización, e implica que las estrategias a implementar en su búsqueda, no son acciones aisladas, sino parte de una orientación estratégica que atraviesa a toda la organización. Así, podríamos definir a las estrategias de sostenibilidad como un conjunto sistemático y deliberado de decisiones, políticas, acciones y procesos diseñados por las organizaciones para integrar de manera coherente los principios del desarrollo sostenible en su gestión, operaciones, productos y relaciones con sus grupos de interés, con el objetivo de crear valor económico, ambiental y social en el corto, medio y largo plazo.

En la literatura contemporánea, las estrategias de sostenibilidad se definen como el conjunto de políticas, prácticas y decisiones empresariales orientadas a generar valor económico, considerando simultáneamente el impacto ambiental y social de las actividades de la organización (Porter & Kramer, 2006; Lozano, 2015). Estas estrategias forman parte de lo que, en términos más amplios, se conoce como políticas de Responsabilidad Social Empresarial (RSE) o, en la terminología más reciente, criterios Gobernanza Social y Ambiental, ESG (Environmental, Social and Governance). Es interesante rescatar el concepto de Rieznik Lamana y Haja, (2005), quienes definen a las estrategias de sostenibilidad o Buenas Prácticas Ambientales como acciones o iniciativas con repercusiones tangibles y mesurables en cuanto a la mejora de la calidad de vida de los habitantes y del medio ambiente de una forma sostenible y que pueden servir como modelos para que otros países o regiones puedan conocerlos y adaptarlos a su propia situación.

En la actualidad, existe un amplio consenso en torno a la idea de que los patrones de consumo y producción insostenibles desempeñan un papel fundamental en la génesis de las tres crisis planetarias que la humanidad enfrenta: el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la contaminación. En razón de esto, el concepto de sostenibilidad empresarial se apoya en el principio de que el desarrollo económico debe satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer las suyas (Brundtland, 1987). Aplicado a la gestión estratégica, esto implica que las empresas integran objetivos sociales y ambientales en sus decisiones de inversión, innovación, cadena de suministro y relación con stakeholders.

Desde la perspectiva de la gestión, las estrategias de sostenibilidad pueden clasificarse según su profundidad y alcance, pudiendo ser estas de cumplimiento regulatorio es decir, aquellas acciones orientadas exclusivamente a satisfacer requerimientos legales. Estrategias reactivas que son implementadas en búsqueda de legitimidad como respuesta a presiones externas. Y finalmente estrategias proactivas donde se produce la incorporación voluntaria de prácticas sostenibles como parte de la identidad y ventaja competitiva de la organización (Hart & Milstein, 2003).

En el contexto del presente trabajo, el interés radica especialmente en analizar cómo estas estrategias son comunicadas y justificadas en el discurso público, por sobre su efectividad material. En este caso el discurso no solo describe prácticas, sino que también construye y proyecta una imagen deseada de la organización frente a sus grupos de interés.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Discurso organizacional

El discurso organizacional puede definirse como el conjunto de mensajes, narrativas, símbolos y textos producidos por una organización para comunicar su identidad, valores, objetivos y estrategias (Fairclough, 1992; Cornelissen et al., 2015). Este discurso abarca múltiples formatos: informes anuales, reportes de sostenibilidad, comunicados de prensa, publicaciones en redes sociales o declaraciones institucionales, entre otros.

El estudio del discurso a partir de las ciencias sociales ha permitido comprender que el lenguaje no solo muestra actos de comunicación, sino también un proceso de construcción social de la realidad. Así el discurso se constituye en una herramienta para entender los procesos de construcción de sentido, de identidades individuales y colectivas, de medios de control y ejercicios de poder (Berger y Luckman, 1966).

Desde un enfoque constructivista, el discurso organizacional no solo refleja la realidad interna de la empresa, sino que la construye y configura (Grant et al., 2004). Es decir, mediante el lenguaje, la organización define quién es, qué defiende, cómo entiende su responsabilidad ante la sociedad y cuál es su posicionamiento estratégico. Así, en el ámbito de la sostenibilidad, el discurso organizacional cumple algunas funciones específicas:

- Legitimación: justificar ante la sociedad, accionistas y reguladores las acciones emprendidas o planificadas.

- Construcción de identidad: proyectar una imagen coherente con valores asociados a la sostenibilidad.

- Gestión de expectativas: influir en la percepción de los grupos de interés (stakeholders) sobre los impactos de la organización.

- Coordinación interna y externa: alinear los mensajes para distintos públicos.

Un aspecto central del discurso organizacional es su carácter estratégico: no se trata de un relato espontáneo, sino de un conjunto de mensajes diseñados deliberadamente, que emplean recursos retóricos, narrativos y visuales para lograr determinados efectos (Livesey, 2002).

En la presente investigación, se entiende al discurso organizacional como la producción textual institucional que hace pública la posición de la empresa frente a la sostenibilidad. Este enfoque permite centrarse en cómo las propias organizaciones construyen discursivamente su compromiso con el desarrollo sostenible.

### 2.2. Retórica organizacional

En su concepción más antigua, la retórica —siguiendo la tradición aristotélica— se entiende como el arte de convencer mediante el uso eficaz de la palabra. Sin embargo, en el contexto organizacional contemporáneo, este arte se convierte en mucho más que una técnica de persuasión: es una herramienta para dar forma a la identidad institucional, encuadrar acciones y construir significados compartidos. Una organización no solo informa sobre sus actividades; elige con cuidado cómo narrarlas, en qué contexto colocarlas y qué emociones o asociaciones pretende despertar en quienes la escuchan o leen. Esa elección discursiva influye, a veces de manera decisiva, en cómo se interpreta su actuación y en el tipo de vínculo que logra establecer con su entorno.

Uno de los aspectos más visibles de la retórica en las organizaciones es su capacidad para generar legitimidad. Toda entidad —sea una empresa, una ONG o una institución pública— necesita algo superador al mero cumplimiento con la normativa o mostrar eficiencia: requiere la aceptación de los grupos sociales con los que interactúa, lo que Suchman (1995) llama “licencia social para operar”. Aquí la retórica desempeña un papel estratégico, pues permite vincular las acciones con valores y expectativas que la comunidad reconoce como propios. Por ejemplo, cuando una compañía encuadra su política ambiental dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), está

situando sus iniciativas en un marco discursivo ampliamente legitimado, lo que refuerza la confianza que proyecta.

La retórica también es crucial para modelar la identidad y la imagen corporativa. Las organizaciones seleccionan con cuidado qué logros mostrar, qué metáforas usar y qué silencios mantener. Como señalan Cheney, Christensen, Zorn y Ganesh (2010), la identidad no es un rasgo fijo, sino que se negocia constantemente en un espacio de intercambio narrativo con los diferentes públicos. Así, la imagen que proyecta una empresa no es el simple reflejo de su actividad real, sino el resultado de un proceso discursivo intencional.

Otra función fundamental de la retórica es su capacidad de persuadir y movilizar a diversos actores. Un discurso bien construido no se limita a explicar un plan, sino que logra que las personas se identifiquen con él y lo hagan propio. Esto es particularmente evidente en procesos de cambio organizacional profundo, como los vinculados a la sostenibilidad. En estos casos, no basta con enunciar objetivos; es necesario generar un clima de confianza y compromiso que permita a empleados, clientes, inversores y comunidades sentirse parte del cambio. Aristóteles (2007) ya advertía que la solidez de un argumento depende tanto de su lógica como de su capacidad de apelar a la emoción y a la credibilidad del orador.

Lejos de reducirse a ornamento o “embellecimiento” del mensaje, la retórica organizacional tiene una función central: articular la identidad corporativa con las expectativas sociales, económicas y políticas del entorno (Sillince & Brown, 2009). Así, la retórica, actúa como filtro interpretativo de la realidad. Las metáforas, analogías y marcos narrativos (framing) que se utilizan no son neutros: condicionan cómo se perciben los problemas y qué soluciones se consideran posibles. Fairhurst y Sarr (1996) muestran que el liderazgo se ejerce en gran medida a través de la gestión del lenguaje, definiendo prioridades, reduciendo la percepción de riesgo en situaciones críticas o, por el contrario, enfatizando la urgencia de actuar.

Conviene recordar que este poder discursivo es también un poder simbólico. Bourdieu (1991) lo plantea con claridad: el lenguaje no solo describe, sino que establece lo que es legítimo, verdadero o incluso imaginable. De ahí que el uso de la retórica conlleve una responsabilidad ética. Puede ser empleada para respaldar acciones auténticas y coherentes, pero también para encubrir aquellas acciones que se implementan en forma ceremonial en la sola búsqueda de legitimidad. Por eso, el análisis crítico del discurso organizacional resulta imprescindible para verificar la congruencia entre lo que se dice y lo que realmente se hace.

En definitiva, la retórica en el discurso organizacional no es un elemento accesorio: es el eje que articula la manera en que las organizaciones se presentan al mundo, buscan legitimidad, configuran su identidad, movilizan a sus públicos y definen el marco interpretativo de la realidad. Comprender este papel permite no solo diseñar estrategias comunicacionales más eficaces, sino también desarrollar una lectura crítica frente a las narrativas que circulan en el espacio público.

En el ámbito de la sostenibilidad, la retórica cumple al menos tres funciones destacadas, en primer lugar, busca explicar los objetivos estratégicos y compromisos técnicos de la organización en un lenguaje comprensible para el público no especializado. En segunda instancia busca persuadir a los grupos de interés sobre la autenticidad y solidez de las iniciativas sostenibles que implementa; y finalmente, pretende presentar una visión de largo plazo que asocie la competitividad de la organización con el desarrollo sostenible.

Si bien en su sentido más clásico, la retórica es el arte de persuadir a través de la palabra, en el contexto organizacional, no se limita a adornar el mensaje: actúa como un mecanismo de construcción de sentido, de legitimación frente a la sociedad y de orientación de percepciones. Dicho de otro modo, una organización no solo comunica lo que hace, sino que elige cuidadosamente cómo contarlo y qué significados quiere que se desprendan de su relato. Esa elección discursiva influye tanto en la forma en que se percibe a la organización como en la interpretación que se hace de sus acciones.

### 2.3. Legitimidad y construcción de identidad organizacional

La legitimidad organizacional se define como la percepción generalizada de que las acciones de una organización son deseables, apropiadas o correctas dentro de un sistema socialmente construido de normas, valores, creencias y definiciones (Suchman, 1995). Esta legitimidad no se da

por sentada, sino que debe ser continuamente construida, mantenida y, a veces, reparada mediante procesos discursivos y simbólicos.

Este concepto tiene un rol central en la perspectiva institucional del análisis organizacional, ya que las organizaciones necesitan ser aceptadas y recibir apoyo social en sus campos organizacionales, lo cual se obtendrá como resultado de la congruencia entre la organización y su entorno. Así, una organización "legítima" será aquella cuyos valores y acciones estén alineados con los valores sociales de su entorno y lo que este espera de ella (Galaskiewcz, 1985). De esta forma, las organizaciones ganan legitimidad incorporando prácticas, técnicas, procesos o valores difundidos en su campo organizacional. En este sentido, Meyer y Rowan (1977) concluyen que la legitimidad es lo que conduce a la adopción de políticas o estructuras, mientras que Scott (2001) la define como la condición que refleja el alineamiento social.

Ocurre entonces, que la adopción de políticas o prácticas vinculadas al cuidado ambiental, cuando responde exclusivamente a una búsqueda de legitimidad o a presiones coercitivas —ya sean regulatorias, normativas o provenientes de grupos de interés—, tiende a derivar en una implementación de carácter ceremonial (Meyer & Rowan, 1977). En estos casos, las acciones adoptadas se convierten en meros procedimientos formales, carentes de un compromiso genuino y de una integración efectiva en la cultura organizacional (DiMaggio & Powell, 1983). Este enfoque insustancial y laxo no solo limita la eficacia de las medidas, sino que también desperdicia la oportunidad de generar impactos ambientales positivos sostenibles, desaprovechando el potencial de transformación que una aplicación estratégica y convencida podría ofrecer (Boiral, 2007).

Así, en contextos donde la presión social y regulatoria en torno a la sostenibilidad es creciente, la legitimidad de las empresas depende en gran medida de cómo presentan públicamente sus compromisos y resultados en materia ambiental y social. Así, el discurso organizacional cumple una doble función: describe acciones y, al mismo tiempo, las justifica frente a sus grupos de interés.

En la práctica, las empresas construyen legitimidad y refuerzan su identidad:

- Adoptando narrativas que vinculan sostenibilidad con innovación, progreso o responsabilidad social.
- Publicando compromisos concretos, indicadores de desempeño y casos de éxito.
- Presentándose como actores conscientes de su impacto territorial y ambiental.

En este trabajo, el análisis parte de la premisa de que las empresas no solo informan sobre prácticas sostenibles, sino que, mediante sus textos, construyen activamente una identidad responsable y buscan legitimar su papel dentro del entorno local y regional.

## 3. METODOLOGÍA

La investigación en curso se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, con un diseño de estudio de casos múltiples, orientado a explorar cómo las empresas del sector metalúrgico y metalmecánico implementan estrategias de sostenibilidad. Se seleccionaron las unidades de análisis mediante un muestreo intencional, priorizando aquellas organizaciones que cuentan con certificaciones ambientales o declaraciones públicas de compromiso con la sostenibilidad. La recolección de datos se realizó a partir del análisis documental de informes corporativos, páginas web y comunicados oficiales, en el caso particular del presente trabajo se analizó el reporte de sostenibilidad 2024 de una empresa del sector metalúrgico. El procedimiento de análisis se apoyó en la codificación temática y en la aplicación de categorías deductivas permitiendo identificar patrones discursivos y evidencias que revelan desde implementaciones sustantivas hasta enfoques principalmente simbólicos de las prácticas ambientales.

El análisis que se presenta en este trabajo se desarrolló en varias etapas complementarias. En primer lugar, se llevó a cabo una lectura y codificación manual de las cartas institucionales para identificar fragmentos clave relacionados con sostenibilidad, inversiones, compromisos climáticos, seguridad y diversidad. Posteriormente, se utilizó ChatGPT como apoyo para afinar la codificación temática y enriquecer la interpretación de los fragmentos, especialmente en lo referido a la

identificación de recursos retóricos y de legitimidad. Finalmente, se aplicó la herramienta Voyant Tools para realizar un análisis léxico más profundo, detectar patrones de frecuencia y coocurrencia, y explorar redes semánticas, lo que permitió contrastar y robustecer los hallazgos iniciales.

La elección del marco analítico se fundamenta en la propuesta de Suchman (1995) sobre legitimidad organizacional. A diferencia de las categorías clásicas de la retórica aristotélica (logos, ethos y pathos), este enfoque resulta más pertinente para el estudio de textos empresariales, dado que permite comprender cómo las organizaciones buscan sostener su credibilidad y aceptación social frente a distintos públicos. La legitimidad pragmática, moral y cognitiva ofrece una lente más ajustada a los contextos contemporáneos de gestión y sostenibilidad, donde el discurso corporativo se orienta tanto a mostrar beneficios concretos como a proyectar valores y a naturalizar determinadas prácticas. En este sentido, optar por el marco de Suchman no solo actualiza el análisis en relación con la literatura contemporánea en estudios organizacionales, sino que además ofrece una herramienta conceptual que permite conectar la retórica de sostenibilidad con dinámicas de legitimación frente a inversionistas, comunidades y organismos internacionales.

## 4. ANALISIS

Este artículo analiza, desde un enfoque retórico-discursivo, el Informe de Sostenibilidad 2024 de una empresa metalúrgica de la región Buenos Aires norte – Santa Fe sur; el cual constituye un material clave para comprender cómo las grandes organizaciones industriales construyen discursivamente su compromiso con el medio ambiente. En este sentido el análisis identifica el uso combinado de datos técnicos, construcción de credibilidad institucional y apelación a valores ambientales, especialmente en estrategias ligadas a la sostenibilidad y al cambio climático.

En particular, se examinaron las cartas institucionales del presidente del directorio y del director ejecutivo, las cuales funcionan como textos de apertura que marcan el tono general de la estrategia comunicada. Ambos discursos comparten una narrativa centrada en la modernización, la responsabilidad corporativa y la apuesta por la innovación tecnológica como motor del desarrollo sostenible.

La carta del director está construida desde un marco empresarial clásico, donde la sostenibilidad y el compromiso ambiental aparecen subordinados a la lógica de crecimiento económico, competitividad, inversiones y contextos de mercado. El texto enmarca las acciones ambientales como parte de una estrategia más amplia de modernización, reducción de costos y cumplimiento normativo, antes que como un cambio transformador o fundado en valores ecológicos profundos. Este encuadre revela que el compromiso ambiental funciona retóricamente más como instrumento de legitimación frente a inversionistas, reguladores y sociedad civil que como motor genuino de redefinición del modelo productivo.

El discurso institucional examinado evidencia una fuerte apelación a la legitimidad pragmática, es decir, aquella que se construye en torno a la utilidad percibida por los públicos estratégicos (Tabla 1). Esto se observa en la afirmación de que *“hemos revisado nuestro objetivo fijado en 2021” y en el compromiso explícito de “reducir un 15 % la intensidad de emisiones al 2030”.* La cifra concreta transmite la idea de eficiencia y control de la gestión ambiental, generando la impresión de que la empresa tiene un rumbo claro y medible hacia la descarbonización. Sin embargo, el hecho de que se hable de intensidad de emisiones —y no de emisiones absolutas— introduce un matiz importante: si la producción crece, las emisiones totales podrían no disminuir, lo cual limita el alcance transformador de la medida. Esta forma de comunicar metas cuantificables, aunque técnicamente válidas, responde más a una lógica de legitimación frente a reguladores e inversores que a un compromiso radical con la reducción de la huella ambiental.

Algo similar ocurre con la referencia a las inversiones en energías renovables, donde se señala que la iniciativa *“reemplaza el 90 % de nuestras adquisiciones eléctricas de la red nacional con energías renovables”*. Aquí nuevamente la estrategia discursiva se apoya en cifras contundentes que buscan transmitir utilidad, eficiencia y resultados verificables. Este énfasis en beneficios cuantificables refuerza la legitimidad pragmática, mostrando la sostenibilidad como un medio para mejorar la competitividad y dar garantías de buena gestión frente a los grupos de interés.

Más allá de lo pragmático, estos compromisos también buscan consolidar una legitimidad moral. La sostenibilidad se declara como "*parte integral de nuestra agenda*", en sintonía con el consenso social y ético de que las empresas deben asumir responsabilidades ambientales. Presentar inversiones en renovables y metas de reducción de emisiones como un deber moral pretende mostrar a la organización como un actor responsable y alineado con valores ampliamente compartidos por la sociedad, las comunidades locales y el mercado internacional.

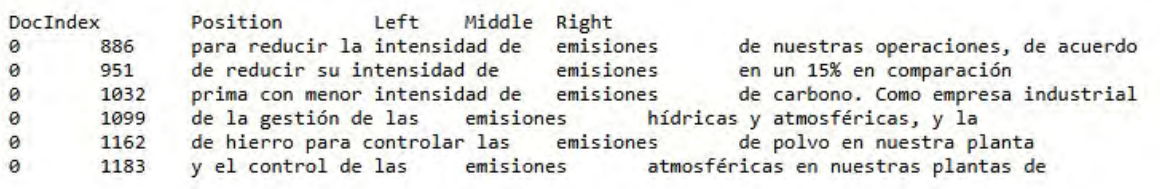
Finalmente, aunque en un plano secundario, también se observa un recurso a la legitimidad cognitiva, en tanto las medidas se enmarcan en una "*hoja de ruta*" hacia la descarbonización que se presenta como natural e inevitable. La incorporación de certificaciones y estándares internacionales refuerza esta narrativa, generando la impresión de que las acciones emprendidas no solo son correctas y útiles, sino también "lo que se espera" de cualquier empresa moderna del sector. Este tipo de legitimidad busca que los compromisos se perciban como obvios y necesarios, reduciendo la posibilidad de cuestionamientos externos.

No obstante, una lectura crítica permite advertir tensiones y limitaciones en el discurso. La meta del 15 % resulta poco ambiciosa si se la compara con los compromisos internacionales establecidos en el marco del Acuerdo de París, mientras que la mención a la energía renovable se presenta sin una reflexión sobre los impactos históricos de la actividad, ni sobre las dificultades estructurales que enfrenta la industria para transitar hacia modelos productivos de bajas emisiones. En este sentido, aunque los mensajes transmiten responsabilidad y progreso, también pueden interpretarse como estrategias discursivas de legitimación más que como compromisos genuinamente transformadores.

*Tabla 1 Recursos retóricos utilizados.*

| Recurso | Ejemplo | Función |
|---|---|---|
| **Datos y cifras** | *"USD 225 millones en parque eólico", "90% de la energía comprada reemplazada"* | Construir credibilidad técnica y pragmática |
| **Autoridad moral** | *"La seguridad de nuestro personal, la protección del medioambiente y el apoyo al desarrollo inclusivo… son parte integral de nuestra agenda"* | Mostrar responsabilidad social corporativa |
| **Apelación emocional** | *"Lamentamos profundamente la pérdida de vidas"* | Construir cercanía y sensibilidad |

El análisis de concordancias realizado con Voyant Tools permite observar que el término "emisiones" aparece recurrentemente asociado a expresiones de reducción y control (Figura 1). Ejemplos como "*para reducir la intensidad de emisiones*" o *"de reducir su intensidad de emisiones en un 15 %"* refuerzan una narrativa de gestión eficiente y cuantificable, enmarcada en una lógica de mejora incremental. A su vez, las referencias al "control de las emisiones atmosféricas" o a la "gestión de las emisiones hídricas y atmosféricas" muestran un énfasis técnico, centrado en la idea de supervisión y cumplimiento de estándares. Sin embargo, lo notable es que el término no aparece acompañado de referencias a los impactos sociales o comunitarios de estas emisiones, lo que revela un framing predominantemente técnico y gerencial. Este patrón contribuye a reforzar la legitimidad pragmática, ya que se privilegia mostrar resultados medibles y procedimientos de control, mientras se omiten dimensiones más amplias de responsabilidad ambiental.



| DocIndex | Position | Left | Middle | Right |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 886 | para reducir la intensidad de | emisiones | de nuestras operaciones, de acuerdo |
| 0 | 951 | de reducir su intensidad de | emisiones | en un 15% en comparación |
| 0 | 1032 | prima con menor intensidad de | emisiones | de carbono. Como empresa industrial |
| 0 | 1099 | de la gestión de las | emisiones | hídricas y atmosféricas, y la |
| 0 | 1162 | de hierro para controlar las | emisiones | de polvo en nuestra planta |
| 0 | 1183 | y el control de las | emisiones | atmosféricas en nuestras plantas de |

*Figura 1 Análisis de Voyant Tools.*

En síntesis, el análisis de contexto realizado sobre la carta del director con Voyant Tools acerca del término “emisiones” (Tabla 2), muestra un patrón discursivo consistente: las menciones se vinculan principalmente con ideas de reducción, intensidad, control y gestión. Este encuadre privilegia un enfoque técnico y cuantificable que refuerza sobre todo la legitimidad pragmática, al presentar a la organización como capaz de medir, supervisar y mejorar sus procesos. En menor medida, aparece también la legitimidad moral, cuando se asocian las reducciones a compromisos éticos frente al cambio climático, y la legitimidad cognitiva, en tanto se naturalizan las acciones de control y mitigación como parte inevitable del progreso industrial. Sin embargo, resulta significativo que en ningún caso el término aparezca acompañado de referencias a impactos sociales o comunitarios, lo que evidencia un discurso centrado en la gestión técnica y la reputación, más que en una mirada integral de la sostenibilidad.

*Tabla 2 Asociaciones léxicas de “emisiones” y legitimidad reforzada*

| **Fragmento de contexto (Voyant Tools)** | **Término asociado clave** | **Tipo de legitimidad reforzada** | **Observación crítica** |
|---|---|---|---|
| *“para reducir la intensidad de emisiones”* | reducción / intensidad | Pragmática | Presenta un dato técnico que transmite eficiencia, pero no implica reducción absoluta. |
| *“de reducir su intensidad de emisiones en un 15 %”* | 15 % / comparación | Pragmática y moral | Apela a la utilidad cuantificable y a la idea de responsabilidad ética frente al clima. |
| *“prima con menor intensidad de emisiones de carbono”* | menor intensidad | Cognitiva | Naturaliza la mejora incremental como parte del progreso industrial. |
| *“de la gestión de las emisiones hídricas y atmosféricas”* | gestión / hídricas | Pragmática | Refuerza la idea de control técnico y gerencial. |
| *“de hierro para controlar las emisiones de polvo en nuestra planta”* | control / polvo | Pragmática | Subraya la capacidad de supervisión de procesos locales, sin referencia a impactos sociales. |
| *“y el control de las emisiones atmosféricas en nuestras plantas de”* | control / atmosféricas | Cognitiva y pragmática | Normaliza el control como práctica inevitable, reforzando imagen de cumplimiento. |

En referencia a la carta del director ejecutivo, el énfasis recae en la innovación tecnológica y la expansión productiva, que se presentan como motores de la sostenibilidad. Se afirma, por ejemplo, que *“este proyecto será uno de los más sostenibles de su tipo en América*” en referencia a una inversión fuera de la Argentina, lo que refuerza la legitimidad moral al asociar el crecimiento de la compañía con valores de modernidad y responsabilidad ambiental. A su vez, cuando se declara que “*el crecimiento industrial y la gestión ambiental van de la mano*”, se construye una forma de legitimidad cognitiva, al presentar la compatibilidad entre desarrollo económico y sostenibilidad como un hecho evidente e incuestionable. Finalmente, la legitimidad pragmática aparece en el uso de cifras concretas que evidencian beneficios tangibles, como cuando se señala que la incorporación de energías renovables en Argentina *“reduce aproximadamente 111 mil toneladas de emisiones de $CO_2$ al año”*. En conjunto, el discurso configura una narrativa que combina expansión

y responsabilidad, aunque sin problematizar las tensiones que persisten entre la lógica de crecimiento industrial y los desafíos estructurales de la transición energética.

La comparación realizada entre ambas declaraciones evidencia que, aunque los énfasis retóricos difieren entre ambos directivos —uno orientado a inversiones ambientales y otro a la innovación tecnológica—, en los dos casos la sostenibilidad queda subordinada a la lógica del negocio. Las tres dimensiones de legitimidad (pragmática, moral y cognitiva) se utilizan de manera complementaria para transmitir eficiencia, responsabilidad y modernidad, pero sin abordar las tensiones estructurales ni los impactos históricos de la industria (Tabla 3). De este modo, el discurso funciona más como un recurso de legitimación reputacional que como una propuesta de transformación profunda.

*Tabla 3 Cuadro comparativo de los discursos institucionales*

| Elemento central | Autoridad A (Presidente del directorio) | Autoridad B (Director ejecutivo) | Observación crítica |
|---|---|---|---|
| **Énfasis principal** | Inversiones ambientales y reducción relativa de emisiones | Innovación tecnológica y expansión regional | Ambos subordinan la sostenibilidad a la lógica de negocios |
| **Legitimidad pragmática** | *"Reducir un 15% la intensidad de emisiones al 2030"* | *"Reduciendo aproximadamente 111 mil toneladas de $CO_2$ al año"* | Se presentan beneficios tangibles pero relativos |
| **Legitimidad moral** | *"La protección del medioambiente… parte integral de nuestra agenda"* | *"Este proyecto será uno de los más sostenibles de su tipo en América"* | Se refuerza la imagen responsable, sin autocrítica profunda |
| **Legitimidad cognitiva** | Uso de certificaciones y adhesión a estándares | *"El crecimiento industrial y la gestión ambiental van de la mano"* | Se naturalizan las acciones como parte del progreso inevitable |
| **Omisiones notorias** | No se mencionan impactos históricos ni controversias | No se mide el impacto total de las nuevas instalaciones | Se invisibilizan tensiones estructurales de la industria siderúrgica |

## 5. CONCLUSIONES

En referencia a la metodología el presente artículo muestra los avances de un trabajo más extenso y los primeros intentos de incorporar la IA al análisis de texto. Presenta las limitaciones propias de las primeras experiencias con estas herramientas. Futuras líneas de trabajo podrían incluir la triangulación de este análisis discursivo con percepciones de actores locales, prensa independiente y datos externos de impacto ambiental, para evaluar la correspondencia entre el discurso oficial y la experiencia de la comunidad.

En referencia al análisis, al comparar ambos textos se observa una coherencia discursiva: la sostenibilidad se presenta como un recurso estratégico que combina legitimidad pragmática (beneficios tangibles), legitimidad moral (asociación con valores positivos) y legitimidad cognitiva (naturalización del discurso), pero siempre subordinada a la lógica de la competitividad. Predomina, por tanto, una narrativa orientada a reforzar la reputación y la confianza externa más que a transformar radicalmente el modelo productivo.

En síntesis, el informe transmite una imagen consistente de compromiso ambiental, aunque las metas expresadas en términos relativos, la ausencia de autocrítica y la omisión de los desafíos estructurales de la industria sugieren que la sostenibilidad funciona como una estrategia de legitimidad organizacional más que como un verdadero proyecto de cambio transformador.

## 6. REFERENCIAS

Aristóteles. (2007). *Retórica*. Madrid: Gredos.

Berger, P. L., & Luckmann, T. (1966). *The social construction of reality: A treatise in the sociology of knowledge*. Garden City, NY: Anchor Books.

Boiral, O. (2007). Corporate greening through ISO 14001: A rational myth? *Organization Science, 18*(1), 127–146. https://doi.org/10.1287/orsc.1060.0224

Bourdieu, P. (1991). *Language and symbolic power*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Cheney, G., Christensen, L. T., Zorn, T. E., & Ganesh, S. (2010). *Organizational communication in an age of globalization: Issues, reflections, practices* (2nd ed.). Long Grove, IL: Waveland Press.

Cornelissen, J., Durand, R., Fiss, P. C., Lammers, J. C., & Vaara, E. (2015). Putting communication front and center in institutional theory and analysis. *Academy of Management Annals, 9*(1), 113–173. https://doi.org/10.5465/19416520.2015.999201

DiMaggio, P. J., & Powell, W. W. (1983). The iron cage revisited: Institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields. *American Sociological Review, 48*(2), 147–160. https://doi.org/10.2307/2095101

Fairclough, N. (1992). *Discourse and social change*. Cambridge: Polity Press.

Fairhurst, G. T., & Sarr, R. A. (1996). *The art of framing: Managing the language of leadership*. San Francisco, CA: Jossey-Bass.

Galaskiewicz, J. (1985). Interorganizational relations. *Annual Review of Sociology, 11*, 281–304. https://doi.org/10.1146/annurev.so.11.080185.001433

Grant, D., Keenoy, T., & Oswick, C. (2004). Organizational discourse: Exploring the field. In D. Grant, C. Hardy, C. Oswick, & L. Putnam (Eds.), *The Sage handbook of organizational discourse* (pp. 1–36). London: Sage.

Livesey, S. M. (2002). The discourse of the middle ground: Citizen Shell commits to sustainable development. *Management Communication Quarterly, 15*(3), 313–349. https://doi.org/10.1177/0893318902153001

Meyer, J. W., & Rowan, B. (1977). Institutionalized organizations: Formal structure as myth and ceremony. *American Journal of Sociology, 83*(2), 340–363. https://doi.org/10.1086/226550

Scott, W. R. (2001). *Institutions and organizations* (2nd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.

Sillince, J. A. A., & Brown, A. D. (2009). Multiple organizational identities and legitimacy: The rhetoric of police websites. *Human Relations, 62*(12), 1829–1856. https://doi.org/10.1177/0018726709336626

Suchman, M. C. (1995). Managing legitimacy: Strategic and institutional approaches. *Academy of Management Review, 20*(3), 571–610. https://doi.org/10.2307/258788

# SUSTITUCIÓN DE GENERADORES DIÉSEL POR GAS NATURAL: REDUCCIÓN DE EMISIONES Y RUIDO EN UN CAMPAMENTO MINERO.

Tarcaya, Héctor Rubén; Pistán, Héctor Darío; Argenti, Pablo; Tarcaya, Mauro

Facultad de Ingeniería, CIUNSa, Universidad Nacional de Salta.

rutaunsa@gmail.com

**RESUMEN**

Este estudio analiza los beneficios ambientales de la sustitución de tres grupos electrógenos diésel por un generador a gas natural en la usina de un campamento minero ubicado en la Puna salteña. La implementación del nuevo sistema tuvo como objetivo principal la reducción del nivel de ruido y las emisiones de gases de efecto invernadero. Se aplicó una metodología comparativa y cuantitativa, basada en mediciones en campo y estimaciones mediante factores de emisión reconocidos internacionalmente. Tras la transición, se observó una disminución significativa del ruido ambiental, junto con una reducción considerable de las emisiones estimadas de $CO_2$. El estudio resalta mejoras en el entorno laboral inmediato, evidenciando que la adopción de gas natural constituye una estrategia viable hacia una minería más sostenible y segura.

**Palabras Claves:** Gas natural. Emisiones. Ruido industrial. Generadores eléctricos. Minería sostenible.

**ABSTRACT**

This study analyzes the environmental benefits of replacing three diesel generator sets with a natural gas generator at the power plant of a mining camp located in the Puna region of Salta, Argentina. The primary objective of implementing the new system was to reduce noise levels and greenhouse gas emissions. A comparative and quantitative methodology was applied, based on field measurements and estimates using internationally recognized emission factors. Following the transition, a significant decrease in ambient noise was observed, along with a considerable reduction in estimated $CO_2$ emissions. The study highlights improvements in the immediate working environment, demonstrating that the adoption of natural gas is a viable strategy for achieving safer and more sustainable mining operations.

**Keywords:** Natural gas. Emissions. Industrial noise. Power generators. Sustainable mining.

## 1. INTRODUCCIÓN

La generación eléctrica en establecimientos mineros ubicados en regiones remotas de altitud, como la puna, enfrenta desafíos relevantes, tanto en lo que respecta en su incidencia al medio ambiente como al microambiente laboral. Tradicionalmente, en campamentos mineros ubicados en la región Puna salteña, norte de Argentina, la energía se obtiene mediante grupos electrógenos a gasoil, configurados frecuentemente como conjuntos múltiples para alcanzar la potencia requerida. En este contexto, estos grupos electrógenos a gasoil, robustos y confiables, resultan de instalación inmediata en lugares lejanos y, a la vez generan niveles elevados de ruido, vibraciones y emisiones contaminantes, lo que afecta la salud del personal y el ecosistema local (Torres Soto, 2023).

Por otro lado, los generadores a gas natural, presentan una alternativa de generación de energía eléctrica, con la dificultad de requerir una instalación de red de gas, pero, en contraste, con posibles ventajas por sus menores niveles de ruido, vibraciones y emisiones, favoreciendo mejores condiciones operativas y ambientales (Quintana Martínez, 2019; JL Energy, 2025).

El presente trabajo se enfoca en una intervención realizada en una usina de generación eléctrica en un campamento minero, que originalmente utilizaba tres grupos electrógenos en paralelo alimentados con gasoil, con capacidad de generación del conjunto de 1500 kW. En busca de una solución más eficiente y ambientalmente amigable, se decidió reemplazar este sistema por un único generador alimentado a gas natural con igual capacidad de generación.

La elección del gas natural como combustible responde a diversas ventajas, entre ellas, una menor intensidad de carbono respecto al diésel, una combustión más limpia y niveles de ruido reducidos. Según la *International Energy Agency* (IEA, 2022), estos factores lo posicionan como una alternativa más sostenible en diversos sectores industriales. Estudios anteriores han demostrado que el uso de gas natural en generación distribuida puede reducir entre un 20 % y un 30 % las emisiones de $CO_2$ en comparación con sistemas basados en diésel (González et al., 2020). Adicionalmente, la reducción del ruido es un factor relevante en entornos laborales donde la exposición prolongada a altos niveles sonoros puede tener efectos negativos sobre la salud de los trabajadores. La *World Health Organization* (WHO, 2018) establece lineamientos específicos para la exposición al ruido ambiental, con el objetivo de prevenir riesgos para la salud física y mental.

Este análisis busca no solo validar cuantitativamente los beneficios esperados de esta transición energética, sino también brindar una evaluación técnica que pueda ser replicada en otros entornos mineros o industriales con características similares. Para ello, se comparan parámetros clave antes y después del reemplazo, como el nivel sonoro, el consumo de combustible, las emisiones estimadas de $CO_2$ y otros indicadores operativos.

El cambio se inserta en un contexto más amplio de políticas ambientales empresariales y regulaciones que promueven la reducción de emisiones industriales, en línea con los marcos normativos adoptados por muchas compañías mineras internacionales y las recomendaciones del *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021). La adopción de fuentes energéticas más limpias no solo contribuye a mejorar la imagen corporativa, sino que también puede generar ventajas competitivas mediante la reducción de costos a mediano y largo plazo.

Este estudio analiza los beneficios ambientales de la sustitución de tres grupos electrógenos diésel por un generador a gas natural, y así contribuir con una base sólida para futuras decisiones de inversión en infraestructura energética en zonas remotas.

## 2. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolla mediante un enfoque metodológico mixto, que combina el análisis documental con la observación y recopilación de datos en campo, con el propósito de evaluar comparativamente las emisiones asociadas a dos modalidades de generación eléctrica: una basada en el uso de gasoil y otra en gas natural.

En una primera etapa, se realiza una revisión de fuentes bibliográficas, normativas técnicas y artículos académicos que abordan la generación eléctrica, la emisión de ruidos, las emisiones de CO2, la higiene y seguridad de los puestos de trabajo (Torres Soto, 2023; Quintana Martínez, 2019; Kolodziej et al, 2019; Tarcaya et al, 2016; Arenas et al, 2017; Tarcaya et al, 2021), principalmente en contextos de generación a gasoil y a gas natural. Este análisis documental permite establecer un marco de referencia técnico-científico y definir los principales parámetros a evaluar en cada escenario.

Para la observación y recopilación de datos en campo, la metodología es comparativa y cuantitativa basada en mediciones y estimaciones basadas en factores de emisión reconocidos. Se analizan dos escenarios:

- Escenario diésel: operación con tres grupos electrógenos a gasoil, cada uno con capacidad aproximada de 500 kW.
- Escenario gas natural: operación con un solo generador a gas natural de 1500 kW.

Los datos se recolectan durante un período de operación continua de 7 días en cada escenario, con niveles de actividad productiva equivalente. Se consideran las siguientes variables:

- Consumo de combustible (litros de gasoil/día y m³ de gas natural/día).
- Estimación de emisiones de $CO_2$ (basado en los factores IPCC).
- Nivel sonoro (medido en dB con sonómetro clase 1).
- Percepción de los trabajadores (mediante encuesta semiestructurada sobre condiciones acústicas y ambientales).

La combinación de ambos métodos, documental y empírico, permite validar la información obtenida y, también contextualizarla en condiciones reales de operación, asegurando una evaluación representativa de las emisiones de cada tecnología de generación.

## 3. DESARROLLO

### 3.1. Factores de emisión de CO2

Para la estimación de las emisiones de dióxido de carbono, se consideran los factores de conversión propuestos por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2008), en la versión 1.0 del Documento “La huella de carbono del argentino promedio”. Dichos factores de conversión se expresan en la Tabla 1.

*Tabla 1. Factores de emisión de CO2 correspondientes al gasoil y al gas natural.*

| **Combustible** | **Factor de emisión de CO2** |
|---|---|
| Gasoil | 2,77 (KgCO2-e /litro) |
| Gas natural | 1,95 (Kg CO2-e /m3) |

### 3.2. Consumos de combustibles y emisiones de CO2

Durante el periodo de siete días se consideraron los consumos de la operación del conjunto de 3 grupos diésel, verificando una regularidad en la operación. En la situación del funcionamiento del generador a gas, también se consideraron los consumos durante el periodo de siete días. Ambos consumos acumulados se multiplican por los correspondientes factores de emisión de CO2, cuyos resultados se expresan en la Tabla 2.

*Tabla 2. Emisiones de CO2 en función de los consumos de combustibles.*

| **Combustible** | **Consumos promedios por día** | **Kg de CO2 emitidos** |
|---|---|---|
| Gasoil | 13650litros | 37810 KgCO2-e |
| Gas natural | 16786 m3 | 32733 Kg CO2-e |

De los resultados se aprecia que las emisiones de CO2 en la operación del generador a gas, son menores en un 14% respecto a las emisiones del conjunto de los 3 grupos diésel.

### 3.3. Nivel sonoro

La generación eléctrica de la presente investigación ocurre en la usina de un campamento minero, la cual consiste en un ambiente de 42 m2 de superficie y 4 metros de altura, construido de chapas en sus laterales y techo. En dicho ambiente, utilizando un sonómetro digital, se realiza el monitoreo de

nivel sonoro durante una hora continua diaria, en siete días seguidos de operación. El monitoreo se realiza en ambos escenarios, en similares niveles de actividad productiva. Los valores del Nivel equivalente semanal se expresan en la Tabla 3.

*Tabla 3. Niveles sonoros observados.*

| **Escenario** | **Nivel sonoro (Nivel equivalente semanal)** |
|---|---|
| Diesel: Conjunto de grupos a gasoil | 92 dBA |
| Gas natural: 1 generador a gas | 80 dBA |

Del análisis de mediciones reportadas de presión sonora mediana y vibraciones, el conjunto de 3 generadores diésel produce niveles del orden de 92dBA, mientras que un generador a gas natural emite niveles menores a 80 dB. Para una jornada de 8 horas, el límite de exposición es de 85 dBA, según lo establecido por la Secretaría de Riesgos de Trabajo (SRT, 2003) en la Resolución SRT Nº 295/2003, por lo que mediante la operación del generador a gas natural se obtiene una notable mejora en las condiciones del microambiente laboral en lo que respecta a nivel sonoro.

La combustión diésel genera un nivel sonoro altamente intrusivo que se amplifica en recintos reducidos con construcción metálica, afectando el bienestar del personal (Torres Soto, 2023). Por otro lado, los generadores a gas natural ofrecen una alternativa más limpia y silenciosa.

### 3.4. Percepción de los trabajadores

Con el objetivo de evaluar la percepción de los trabajadores respecto a las condiciones operativas y ambientales de la usina, se llevó a cabo una serie de entrevistas semiestructuradas dirigidas al personal de ambos turnos. Participaron cuatro trabajadores (dos por turno), con experiencia en la operación bajo dos escenarios distintos:

- Escenario diésel: operación con 3 grupos a gasoil.

- Escenario gas natural: operación con un solo generador a gas natural.

Durante la entrevista, se consultó a los operarios sobre aspectos vinculados a:

- Condiciones acústicas durante el funcionamiento de los equipos.

- Condiciones ambientales, tales como presencia de derrames, limpieza del entorno y facilidad de operación.

- Comparación general entre ambos escenarios en términos de comodidad y carga operativa.

De forma unánime, los cuatro trabajadores coincidieron en que el escenario del generador a gas resulta notablemente más silencioso, lo que contribuye a un ambiente de trabajo más confortable. Asimismo, destacaron que este sistema no presenta derrames de combustible ni requiere la manipulación de gasoil, lo que reduce riesgos y simplifica significativamente las tareas de operación y mantenimiento.

## 4. CONCLUSIONES.

La evaluación comparativa entre los dos escenarios de generación eléctrica en la usina del campamento minero, uno basado en un conjunto de 3 grupos electrógenos diésel y otro con un único generador a gas, permite concluir que el cambio hacia el sistema a gas resulta ampliamente beneficioso.

Desde el punto de vista de las condiciones acústicas, los registros medidos y la percepción del personal operativo indican una reducción significativa del nivel de ruido, lo cual mejora el confort y la seguridad en el entorno de trabajo. En cuanto a las condiciones ambientales, el nuevo sistema elimina los derrames de combustible, mejora la limpieza general y reduce la necesidad de manipulación de sustancias peligrosas como el gasoil, simplificando las tareas operativas y de mantenimiento.

Además, el generador a gas contribuye a una menor emisión de gases de efecto invernadero, particularmente $CO_2$, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y reducción del impacto ambiental del proyecto.

De este modo, se cumple con el objetivo propuesto de evaluar ambas alternativas de generación eléctrica, aplicando una metodología mixta, que combinó el análisis documental con un trabajo de campo, que incluyó mediciones acústicas y entrevistas semiestructuradas al personal de la usina.

Los resultados obtenidos respaldan la decisión de migrar a un sistema de generación eléctrica más eficiente, silencioso y ambientalmente responsable.

## 5. REFERENCIAS.


Arenas, A., Tarcaya, H., Arciénaga, A. (2017). Relevamiento energético en una industria de boratos. X Simposio Internacional de Ingeniería Industrial: actualidad y nuevas tendencias. Oberá.

González, R., Martínez, L., & Vargas, J. (2020). Evaluación del uso de gas natural en sistemas de generación distribuida en zonas remotas. Revista de Energía y Medio Ambiente, 45(2), 95–106. https://doi.org/10.1234/rem45.2020.02.095

Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

International Energy Agency. (2022). The Role of Gas in Today's Energy Transitions. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/the-role-of-gas-in-todays-energy-transitions

JLEnergy. (2025). Plantas de luz a diésel vs gas: Ventajas y desventajas. https://www.jlenergy.com.mx/blog/comparativa-plantas-luz-diesel-gas-cdmx-edomex/

Kolodziej, S. F., Kraus, M. A., Tarcaya, H. R., & Posluszny, L. H. (2019). Análisis de un puesto de trabajo en el sector de obras públicas de la Municipalidad de Oberá, Misiones. Salão Do Conhecimento, 5(5).

Quintana Martínez, I. (2019). Medida, análisis y control del ruido industrial. Trabajo final de Máster, Universidad Politécnica de Madrid.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2008). La huella de carbono del argentino promedio. Versión 1,0. Argentina.

Secretaría de Riesgos de Trabajo (2003). Resolución SRT Nº 295/2003 Higiene y seguridad en el trabajo. Especificaciones técnicas.

Tarcaya, H. R., Jakúlica, R., & Rodríguez, H. I. (2016, noviembre). Evaluación de la gestión de seguridad y salud ocupacional en una organización. IX Congreso Argentino de Ingeniería Industrial, Salta. ISBN 978-987-1896-50-9

Tarcaya, H.R., Arenas, A. (2021). Greenhouse gas emission in urban passenger transport. Transportation Research Procedia, Volume 58, Pages 158-164. ISSN 2352-1465. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.022.

Torres Soto, M. (2023). Plan de mitigación del impacto del ruido ambiental en una empresa industrial. Trabajo final de Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional Federico Villarreal.

World Health Organization (2018). Environmental noise guidelines for the European region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. https://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018

# METODOLOGÍA SISTEMÁTICA PARA EL ANÁLISIS, COMPRENSIÓN DEL CONTEXTO Y EXPECTATIVAS DE PARTES INTERESADAS EN ORGANIZACIONES EDUCATIVAS

Gallegos, María Laura

UTN - Universidad Tecnológica Nacional

**RESUMEN**

La Gestión de Calidad y Mejora Continua se afianzan con alta aplicación en diversos campos y áreas y uno de ellos es el ámbito de las Universidades y del servicio educativo que provee. La necesidad de mejorar para obtener resultados óptimos y sostenibles cobra relevancia a partir de los nuevos contextos tecnológicos globales, procurando adaptar el servicio de formación a los cambios constantes y cada vez más precipitados del contexto para dar respuesta y satisfacer necesidades, en un marco de planificación estratégica, con la responsabilidad de aportar al desarrollo a la sociedad en un marco regulado, sostenible y de constante innovación. Este trabajo analiza y presenta una propuesta metodológica y sistemática para relevar el contexto y partes interesadas involucradas (*Stakeholders*) utilizando como fuente de información un proceso clave en un departamento de Ingeniería Industrial: la gestión de las PPS. Utiliza para ello técnicas y herramientas de calidad e instrumentos cuali-cuantitativos testeados. La información relevada permite obtener y sintetizar resultados de base para la definición de indicadores de monitoreo y toma de decisiones, poniendo en valor la estandarización y la gestión de la mejora continua en organizaciones del tipo educativas.

**Palabras Clave:** Planificación estratégica. *Stakeholders*. Mejora continua. Práctica Profesional Supervisada. FODA.

**ABSTRACT**

Quality Management and Continuous Improvement are gaining ground with widespread application in diverse fields and areas, one of which is the field of universities and the educational services they provide. The need to improve in order to obtain optimal and sustainable results becomes relevant in the context of new global technological contexts. This effort seeks to adapt training services to the constant and increasingly rapid changes in the context in order to respond to and satisfy needs within a strategic planning framework, with the responsibility of contributing to the development of society within a regulated, sustainable, and constantly innovative framework. This work analyzes and presents a methodological and systematic proposal for assessing the context and stakeholders involved, using a key process in an Industrial Engineering department: PPS management as a source of information. It utilizes quality techniques and tools, as well as tested qualitative and quantitative instruments. The information collected allows for obtaining and synthesizing baseline results for defining monitoring and decision-making indicators, highlighting the value of standardization and continuous improvement management in educational organizations.

**Keywords:** Strategic planning. Stakeholders. Continuous Improvement. Supervised Professional Practice. SWOT.

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La gestión de la calidad, y en especial la mejora continua son esenciales para que las instituciones, entre ellas las educativas, puedan adaptarse a cambios del entorno y responder eficazmente a las necesidades de sus partes interesadas, entre los que se incluyen a los estudiantes, a la comunidad local y a la sociedad en general.

En este marco, y focalizando en los estándares para la Acreditación y la formación por competencias en carreras de ingeniería (ME, 2021), surgen las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo relevar y estudiar el contexto en una Institución de Educación Superior, particularmente en la carrera Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional San Nicolás (UTN FRSN)? ¿Cuáles son las principales cuestiones internas y externas que pueden afectar a este contexto? ¿Cómo monitorear el proceso para que actúe como fuente emergente de información para la toma de decisiones estratégicas?

En este sentido, la Práctica Profesional Supervisada (PPS) en las carreras de Ingeniería se concibe, desde el diseño curricular, como un proceso fundamental para fortalecer la formación práctica y favorecer la vinculación con el sector industrial. A su vez, constituye una valiosa fuente de insumos e información para la carrera, al considerar a los distintos actores que intervienen en el proceso como informantes estratégicos. Tanto desde la experiencia formativa del estudiante como desde la participación de la organización receptora, la PPS genera un proceso de retroalimentación que enriquece el entorno académico e impulsa una vinculación efectiva con los sectores productivo y social, integrando las perspectivas de los participantes como informantes clave y partes interesadas que debe atender y satisfacer el proceso académico. Entre los principales aportes se incluyen la estandarización del proceso de PPS en un marco intersectorial, la mejora de la calidad educativa universitaria desde la formación práctica y la evaluación de competencias adquiridas contrastadas con grupos de interés.

El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar una propuesta metodológica sistemática para relevar y comprender el contexto y expectativas de partes interesadas del proceso de gestión de la PPS, de modo que sirva como insumo clave para favorecer la toma de decisiones estratégicas de la especialidad ingeniería industrial de la UTN-FRSN.

## 2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del trabajo, se utilizó una metodología de carácter empírico y descriptivo (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2020). Se aplicaron técnicas y herramientas de calidad combinadas con instrumentos cuali-cuantitativos, que incluyeron el diseño y validación por expertos de cuestionarios semiestructuradas para la recolección de datos durante el período 2021 a 2024 como prueba piloto (Gallegos et. al, 2022).

El procesamiento y análisis de datos, se realizó aplicando herramientas reconocidas como la matriz FODA para identificar Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas, que permitieron interpretar el contexto educativo y orientar las acciones de mejora. Se utilizaron herramientas de calidad y de mejora para la estandarización y optimización de procesos de gestión de PPS y subprocesos vinculados, tales como como SIPOC: *Suppliers* (proveedores), *Inputs* (entradas), *Process* (proceso), *Outputs* (salidas) y *Customers* (clientes), y Diagramas de Flujo.

## 3. MARCO TEÓRICO

La Norma ISO 9000 distingue “cliente” y/o “usuario” de “partes interesadas”, entendiendo por clientes a las “personas u organizaciones que podrían recibir o que reciben un producto o un servicio destinado a esa persona u organización o requerido por ella” y por Partes Interesadas, las que también se dan a denominar Grupos de Interés (GI) o *Stakeholders*, a aquellas “personas u organizaciones que pueden afectar, verse afectada o percibirse como afectada por las decisiones o actividades que realiza nuestra organización”. (IRAM ISO 9000:2015). Por su parte, la Norma IRAM ISO 21001 el año 2018, define cliente como aquella “persona o grupo de personas que se benefician de los productos y servicios de una organización educativa y a quién la organización educativa está obligada a servir en virtud de su misión de organización educativa”. Asimismo, conceptualiza *Stakeholder* a “aquella persona u organización o que puede afectar, ser afectada por, o percibirse afectado por una decisión o actividad” en coincidencia con ISO 9000; e incluye un anexo, que proporciona una clasificación de partes interesadas en organizaciones educativas. (IRAM ISO 21001:2018)

La instancia de medir la satisfacción y realizar un monitoreo permanente de la percepción del cliente, constituye un desafío para una organización educativa, ya que la posiciona en un rol estratégico como catalizadora de los requisitos y necesidades de la industria, para contribuir en la formación profesional, en el desarrollo económico y social y en la investigación científica atendiendo a los grupos de interés pertinentes. Moscoso Bernal (2024), citando a Acuña (2012), menciona que al referirse a “satisfacer expectativas”, la gestión efectiva de Stakeholders implica identificar sus necesidades, expectativas y

preocupaciones, y trabajar para equilibrar y satisfacer sus intereses de manera estratégica (Moscoso Bernal, 2024). Por su parte, Burgos Figueroa (2022), indica que el término GI (*Stakeholders*) se ha desarrollado frecuentemente en la literatura vinculada a la planeación estratégica, la responsabilidad social y la evolución del impacto de proyectos sobre intervención socioeconómica y que actualmente se inserta como parte de la gestión estratégica de la calidad (Guerra y Jaya, 2016; Amaya, Félix, Rojas y Díaz, 2020) mencionando que influyen de forma decisiva en el método en que las organizaciones llevan a cabo su misión y sus objetivos, facilitan la comprensión del contexto en el que se encuentra inserta una organización, condicionando su actuación. (Masip, 2018; Burgos Figueroa et al., 2022)

Para analizar el contexto de una organización educativa, pueden aplicarse diferentes modelos: PESTEL acrónimo de Político, Económico, Social, Tecnológico, Ecológico y Legal, constituye una herramienta de análisis estratégico útil para examinar los factores externos que afectan a una organización; es decir, es una herramienta para el diagnóstico del macro entorno o entorno general (Arciénaga et al., 2024). Particularmente en el contexto educativo, el análisis PESTEL puede ayudar a entender cómo influye el entorno macroeconómico y sociopolítico en las instituciones. Otra herramienta muy versátil es la matriz FODA, la cual, permite combinar los dos factores internos (fortalezas y debilidades) con otros dos factores de índole externos en consideración (oportunidades y amenazas), posibilitando identificar cuatro escenarios y dentro de ellos las estrategias respectivas. (Arciénaga et al, 2024) De acuerdo con Montesinos González, a partir de las investigaciones realizadas y citando a Chapman, 2004; Rivero, 2018; el desarrollo de la matriz FODA es una buena alternativa para realizar diagnósticos y determinar estrategias de intervención en las organizaciones, (Montesino González et al., 2021) Extensivo al contexto de la Educación Superior, permite colaborar en comprender el contexto estratégico de una organización educativa universitaria y detectar acciones para mejorar la gestión de las operaciones y/o actividades en su contexto interno.

La Norma IRAM ISO 21001:2018 facilita la organización y control de todos los procesos que cumplen las instituciones educativas y permite la identificación de las oportunidades de mejora, tendientes a alcanzar y garantizar la calidad en sus procesos según Rivera & Tupac, 2019, citado por Cerruto Serrano, 2022) Entendiendo “proceso”, como la secuencia lógica de pasos que tiene como fin recibir entradas (inputs), realizarles algún tipo de modificación o transformación, para luego entregar salidas (outputs). (Chafir, 2022) A éstas salidas, en el ámbito de las empresas se les denomina en forma genérica producto, concepto análogo a servicio; que en el ámbito de las organizaciones educativas se refiere según explicita la Norma ISO 21001:2018 al producto educativo, que incluye recursos de aprendizaje, bienes tangibles o intangibles utilizados en apoyo pedagógico de un servicio educativo. (ISO 21001:2018). Frecuentemente la salida de un proceso se transforma en el elemento de entrada del siguiente. La identificación de las distintas interacciones de cada uno de esos procesos, así como su gestión puede denominarse como "enfoque basado en procesos”. (IRAM ISO 9001, 2015) En el ámbito de los sistemas de calidad universitaria, esta mirada de flujo e interacción de actividades, juega un papel significativo para gestionar los procesos académicos de formación, y todas las operaciones asociadas a la prestación de los mismos, en la búsqueda de obtener resultados más eficientes orientados a la satisfacción del cliente interno y externo.

Desde el enfoque de procesos de una organización educativa, los requisitos y elementos de entrada, así como resultados esperados, a fines de la calidad, resulta relevante identificar aquellos que tienen vinculación directa con el entorno y son receptores de su retroalimentación. Para relevar requisitos de manera sistemática y contrastarlos con el contexto industrial, de la industria, servicios y oportunidades de desarrollos científico-tecnológicos, la Práctica Profesional Supervisada (PPS) constituye una fuente emergente de información, como eslabón principal y de continua interacción. Según Camilo Peña Lapeira & Liliana Vargas Puentes, la práctica profesional “*es una oportunidad de fortalecer la relación universidad, estudiante y empresa, ya que, de la relación entre éstos, es que se nutre el mercado laboral, por lo que necesita de una constante evaluación y retroalimentación del proceso. Esto permite identificar cuáles son las tendencias del mercado, sus necesidades, sus orientaciones, sus exigencias y competencias con miras a mantener la competitividad del mercado”*. (Peña Lapeira & Vargas Puentes, 2020) Para la UTN – FRSN, la PPS es “*la extensión orgánica de la universidad en el ámbito de sectores productivos y/o de servicios, o bien en proyectos concretos desarrollados por la institución para sectores o en cooperación con ellos”.* De acuerdo con la Resolución, quienes cursan la carrera deberán realizar *“actividades formativas relativas al rol profesional y aplicar de manera integrada los conocimientos adquiridos a través de la formación académica, relacionados con su especialidad”* (Res. CD 500/23, 2023). La principal misión de la PPS es poner en práctica las competencias profesionales en el contexto del trabajo para complementar la formación superior cumpliendo un mínimo de doscientas (200) horas de índole netamente práctica. (Res. 1543 ME, 2021)

En UTN FRSN, la PPS se encuentra regulada por la Resolución C.D. Nº 500/2023. Dicho reglamento es de aplicación obligatoria y enfatiza en intensificar la formación práctica de estudiantes de las carreras

de grado que se dictan en los Departamentos y sus Anexos. Concentra la descripción de las responsabilidades sobre las funciones y obligaciones de las distintas partes interesadas intervinientes en el contexto académico. También dictamina cuestiones operativas tales como condiciones de aprobación, faltas graves, convenios entre partes, entre otros, y que están disponibles en el sitio web institucional. De acuerdo con el punto 1.2. Reglamentación, incluido en el punto 1. Disposiciones generales, menciona que "Los Consejos Departamentales podrán dictar normas complementarias de aplicación que consideren oportunas, compatible con el presente reglamento comunicando, dentro de los treinta días corridos, tales disposiciones al consejo académico para su conocimiento y aprobación" (Res. CD n° 500/2023), admitiendo la inclusión de especificaciones o normas adicionales del proceso.
El Departamento de Ingeniería Industrial dispone y mantiene de manera digital el conjunto de información documentada en el Campus Virtual Global (CVG) de la especialidad, con especificaciones, registros y normativas a cumplir durante las distintas etapas del proceso.
Desde el punto de vista de la visión estratégica, y siguiendo el enfoque de las cuatro dimensiones (Figura 1) del modelo de gestión denominado Cuadro de Mando Integral (CMI) o *Balanced Scorecard* (BSC) por su denominación en inglés de Kaplan & Norton (Arciénaga et al. 2024; Kapplan y Norton, 1992), la información provista por la gestión de PPS pueden utilizarse como instrumento para conocer las perspectivas del cliente (usuarios) y de GI; y desde su seguimiento, tratamiento y acciones, modificar y/o mejorar los procesos internos, para dar respuesta satisfactoria al contexto externo. Ambos resultados constituyen insumo para alimentar la perspectiva del aprendizaje y crecimiento.
A lo largo de este trabajo se profundiza el estudio y modelo propuesto.

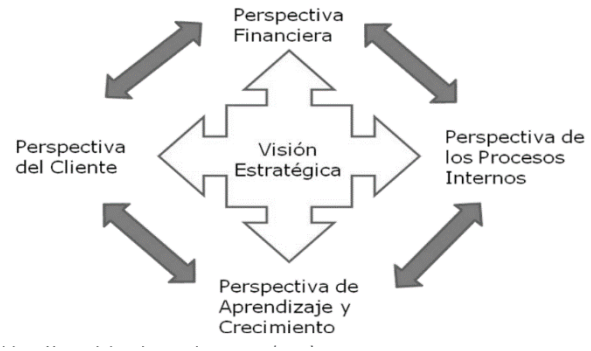



*Figura 1: Perspectivas de Análisis del CMI. Fuente: Arciénaga et al., 2024*

## 4. DESARROLLO

Para llevar adelante el trabajo se realizaron los pasos siguientes:
4.1 Se identificaron los GI (*Stakeholders*) y se estandarizaron los instrumentos para relevar información relevante de partes interesadas consideradas referentes del proceso (de mayor impacto).
4.2 Se sintetizaron cuestiones internas y externas en una matriz FODA y se realizó el análisis de contexto interno-externo, que incluyó el marco normativo y regulatorio.
4.3 Se analizó y estandarizó el proceso de gestión de PPS a partir de la información del contexto y GI mediante herramientas de calidad (SIPOC y Diagramas de Flujo)
4.4 Se desarrolló una metodología para el relevamiento sistemático del contexto en una organización educativa universitaria a partir de la gestión de PPS.
A continuación, se describen los pasos mencionados.

### 4.1 Análisis de Partes Interesadas o GI (Stakeholders)

#### 4.1.1 Identificación de GI

Se relevaron los GI descritos en la resolución 500/23 de CD FRSN que afectan o se ven afectados en el proceso de gestión de PPS. Se identificaron otros GI como la Sociedad en general (comunidad y zona de influencia de la Ciudad de San Nicolás). Se determinaron dos (2) criterios para su análisis de afectación y su escala de valoración, según:
a) Importancia, (categorizado según escala de valoración de la Tabla 3): que constituye la prioridad que tienen o debería darse a ciertos *Stakeholders* por:
- su grado de afectación y vulnerabilidad ante el proyecto,
- su relación con los objetivos del proyecto
- su experiencia o información sobre el proyecto

b) Impacto o influencia (categorizado según escala de valoración de la Tabla 3): lo cual, significa su poder para:
- controlar las decisiones tomadas en relación al proyecto,
- facilitar su implementación,
- ejercer un efecto sobre éste.

*Tabla 1: Matriz de valoración para GI. Fuente: Elaboración Propia*

| Criterios | | Escala de Valoración | | Valorización asignada | |
|---|---|---|---|---|---|
| C1: Importancia | C2: Impacto | C1 | C2 | Total | % |
| Absolutamente significative | Extremandamente alto | **5** | **5** | 25 | **100%** |
| Muy significative | Muy alto | **5** | **4** | 20 | **80%** |
| Significativa | Alto | **4** | **4** | 16 | **64%** |
| Bastante Significativa | Bastante alto | **4** | **3** | 12 | **48%** |
| Moderada | Moderado | **3** | **3** | 9 | **36%** |
| Usualmente Significativa | Un poco bajo | **3** | **2** | 6 | **24%** |
| Un poco Significativa | Bajo | **2** | **2** | 4 | **16%** |
| Muy poco Significativa | Muy Bajo | **2** | **1** | 2 | **8%** |
| Nada Significativa | Nulo | **0** | **0** | 0 | **0%** |

Se realizó el análisis y comprensión de dichos GI: su caracterización, necesidades y expectativas principales, su ubicuidad según si corresponden al contexto interno o externo, el rol de contacto principal de dicho GI en el proceso y el análisis de su afectación (o no afectación) en el proceso, según los criterios mencionados. Los *Stakeholders* relevados Fueron: Estudiantes, Docentes, Organizaciones, Secretaría de extensión, Secretaría de Asuntos Estudiantiles y la Sociedad.
El Diagrama Radar de la Figura 2 permite visualizar gráficamente los criterios de análisis para los grupos de interés identificados y sus valoraciones.

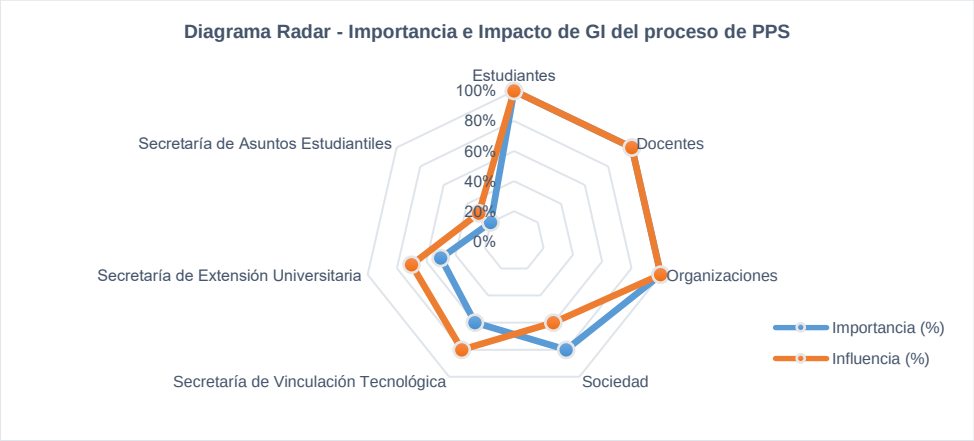



*Figura 2: Diagrama Radar y escala de valoración. Fuente: Elaboración Propia.*

Los GI Estudiantes, Docentes, y Organizaciones obtuvieron la mayor valoración (impacto 5, valoración 25) y se constituyeron como *Stakeholders* referentes. Las Secretarías califican GI internos y de apoyo para la gestión del proceso. La sociedad, con importancia e impacto de valorización media-alta, define e instrumenta políticas que pueden afectar al proceso, y a su vez, recibe aportes de valor de la ingeniería de manera indirecta, como resultado de las actividades en las organizaciones donde hacen la PPS y de la casa de estudios que las facilita (a través de estudiantes y docentes tutores).
La tabla 2 sintetiza los informantes clave.

*Tabla 2: PI (Stakeholders) del proceso de gestión de PPS. Fuente: Elaboración Propia.*

| Grupos de Interés (GI) | Descripción | Categoría | Necesidades y Expectativas | Rol de Contacto / figura |
|---|---|---|---|---|
| Estudiantes | Cursantes regulares de Ingeniería Industrial que se encuentran en condiciones de cursar la PPS | Interna | Cumplir con las horas de formación práctica en el campo con buena performance. | Estudiantes que estén en condiciones de realizar la PPS |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Aplicar saberes (conocimientos, habilidades y destrezas) | |
| Organizaciones | Empresas, instituciones de gestión pública, gestión privada y/o sin fines de lucro vinculadas a la Unidad Académica que reciben estudiantes para realizar PPS. Incluye Grandes, Pymes, organizaciones del sector público, privado y ONG. | Externa | Recibir aportes de valor desde la Ingeniería Industrial<br><br>Profesionalizar procesos, sectores, actividades.<br><br>Contribuir con los (Objetivos de Desarrollo Sostenible) ODS y la responsabilidad social empresaria de formar los nuevos jóvenes profesionales | Tutor de Campo.<br>Tutor que guía el proceso desde el campo, supervisa el Plan de trabajo. |
| Docentes Tutores– Departamento Ingeniería Industrial (DII) UTN FRSN | Unidad Académica que en el que desenvuelve la PPS y brinda marco institucional. | Interna (puede actuar como externo si alterna su rol de tutor de campo, dada su relación con el mercado laboral) | Instalar/ sostener la imagen de la carrera en el mercado regional.<br><br>Formar profesionales con competencias de egreso comprobadas<br><br>Anticiparse a las necesidades y expectativas de los clientes | Docentes tutores que guiarán el proceso académico a lo largo de toda la PPS. |

### 4.1.2 Relevamiento de expectativas

Se aplicaron instrumentos de recolección semiestructurados a los GI mencionados, compuestos por cuestionarios online conformados por preguntas abiertas y cerradas que, luego de superar la instancia de validación de expertos, recibieron los ajustes pertinentes para el diseño definitivo de monitoreo de Stakeholders. resultados descriptivos del estudio exploratorio indicaron que las PPS se realizaron en organizaciones de la ciudad de San Nicolás de los Arroyos (55%), Villa Constitución (18%), Ramallo (16%), la Emilia (3%) y Pergamino (3%). Que el 81% de las PPS se llevó a cabo en el sector privado y el 19% restante en el sector público (Municipio y Universidad). Que, en la gestión privada, se incluyeron multinacionales (48%) y PyMEs (33%), correspondientes principalmente al rubro metalúrgico que caracterizan la región (siderúrgicas y de servicios asociados a éstas), química, construcción, logística, energía. Y que, en la gestión pública, se encuentran el Municipio de San Nicolás, Villa Constitución y el área de investigación de FRSN.

En cuanto a los aportes y satisfacción de los resultados y expetativas, los GI clave asignaron calificaciones altas (4) y muy altas (5) en la escala de valorización: el 82% de los Estudiantes, el 66% de las Organizaciones y el 71% de los Docentes asignaron la calificación más alta de 5; y el 17% de Estudiantes, 34% de las Organizaciones y el 19% de Docentes tutores, asignaron 4, puntaje inmediatamente inferior en la escala de valoración. Sólo un porcentaje mejor (el 2% de estudiantes y 11% de docentes), valorizó con calificación media (3), y aunque significa un buen resultado, constituye un punto de análisis para profundizar criterios de satisfacción y resultados en próximos estudios.

*Tabla 3: Expectativas PI empresas. Fuente: Elaboración propia.*

| **Tema** | **Descripción** |
|---|---|
| Profesionalización de la empresa desde la ingeniería | Resolver situaciones<br>Apropiarse del proceso<br>Creatividad para soluciones<br>Gestión y análisis de datos<br>Involucrarse con la cultura de la empresa<br>Aportar desde la mirada “abierta” del proceso |
| Énfasis en Valores profesionales | Compromiso<br>Interés<br>Responsabilidad<br>Cumplimiento Adaptación |

| | |
|---|---|
| | Proactividad<br>Autoaprendizaje |
| Favorecer oportunidades de reclutamiento | Análisis de perfil<br>Fijación de objetivos<br>Oportunidad de Continuidad contractual |
| Responsabilidad Social Empresaria | Cumplir con expectativas del estudiante<br>Retroalimentación positiva para ambas partes |

### 4.2 Análisis del contexto interno-externo

Para completar el relevamiento y análisis de grupos de interés, los resultados cualitativos obtenidos de preguntas abiertas, se analizaron también mediante la herramienta FODA (Fortalezas-Oportunidades-Debilidades-Amenazas). La Figura 3 muestra la representación esquemática de una matriz FODA, que Arciénaga, explica y ejemplifica para resumir e interrelacionar un análisis de contexto interno y externo ya efectuado (Arciénaga et. al, 2024)

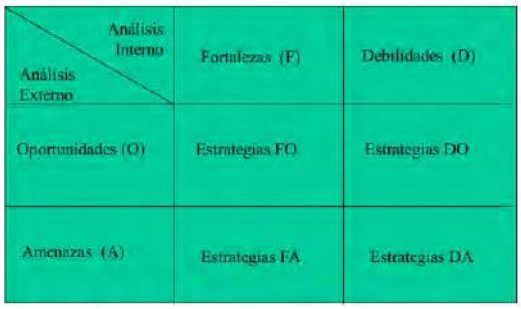



*Figura 3: Matriz FODA. Fuente: Arciénaga et al., 2024*

Siguiendo el modelo de la figura 3, se realizó el relevamiento y diagnóstico del contexto y de partes interesadas, para una revisión estratégica del proceso de PPS. Los resultados se presentan el FODA estratégico la Figura 4.

| ANÁLISIS EXTERNO → / ANÁLISIS INTERNO ↓ | | O | OPORTUNIDADES (O) | A | AMENAZAS (A) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | O1 | Empresas comprometidas con la RSE | A1 | Disminución de organizaciones postulantes |
| | | O2 | Tutores de campo con vínculo a FRSN / interés en articular | A2 | Cambios en el mercado regional |
| | | O3 | Proyección de la región. Sostenibilidad. Cuidad Digital. | A3 | Situación económica Argentina con incertidumbre |
| | | O4 | Interés en JP tecnológicos | A4 | Estudiantes que quedan vinculados a la empresa y no terminan la PPS |
| | | O5 | Nuevas estrategias y necesidades de formación | A5 | Competencia con otras instituciones educativas por PPS |
| **FORTALEZAS (F)** | | **FO** | **ESTRATEGIAS OFENSIVAS (F-O)<br>¿Cómo podemos usar una fortaleza para explotar una oportunidad?** | **FA** | **ESTRATEGIAS DEFENSIVAS (F-A)<br>¿Cómo podemos usar una fortaleza para minimizar o neutralizar una amenaza?** |
| **F1** | Imagen de la carrera | **F1-O1** | Fomentar alianzas estratégicas Facultad - Organización (industria y servicios) | **F3-A1** | Desarrollar PPS en otros campos de aplicación (ONG, proyectos sociales) |
| **F2** | Competencias disciplinares del docente tutor | **F2-O2** | Articular sinergia entre tutores para proyectos, investigación, extensión | **F4-A3** | Realizar vinculaciones con otras regiones para realizar PPS |
| **F3** | Oferta académica - electivas | **F3-03** | Afianzar espacios para realizar PPS (industria, servicios, ONG, municipio) | **F4-A4** | Articulación - Convenios |
| **F4** | Calidad académica del estudiante | **F4-O4** | Divulgar la oferta de mecanismos de vinculación (becas, pasantías, etc.) aclarando que la PPS, constituye una instancia académica de formación | | |
| **F5** | | | | | |
| **DEBILIDADES (D)** | | **DO** | **ESTRATEGIAS DE REORIENTACIÓN (D-O)<br>¿Cómo podemos corregir una debilidad para poder aprovechar una oportunidad?** | **DA** | **ESTRATEGIAS DE SUPERVIVENCIA (D-A)<br>¿Cómo vamos a trabajar una debilidad para minimizar el efecto de una amenaza?** |
| D1 | Plazos del ciclo (200 h + tiempos del informe) | **D1-O1** | Estandarizar la metodología de PPS y definir plazos estimados del ciclo | **D1-A4** | Programas Universitarios para fomentar la culminación de la PPS |
| D2 | Tutores que aplican distintas metodologías | **D2-O2** | Definir la metodología modelo para realizar una guía / tutoría | **D2-A5** | Benchmarking con otras Facultades Universidades sobre métodología |
| D3 | Cuellos de botella (Ej. informe escrito) | **D3-O5** | Definir estrategias para identificar cuellos de botella y reducir brechas | | |
| D4 | | **D2-O2** | Capacitar a docentes supervisores sobre la metodología de tutoría de PPS | | |
| D5 | | | | | |

*Figura 4: Análisis FODA del proceso. Fuente: Elaboración propia.*

La imagen de FRSN, competencias y conocimientos de docentes, oferta académica y de electivas, y la calidad académica del estudiante son fortalezas relevadas; en cuanto a debilidades, se relacionan más con el proceso de autogestión de la PPS desde la mirada del estudiante y los tutores docentes, refiriéndose a tiempos del ciclo, distintas metodologías de trabajo con tutores, y cuellos de botella como el informe escrito que implicaba plazos mayores de los previstos. En cuanto a las oportunidades, las empresas de la región están comprometidas con la Responsabilidad Social Empresaria (RSE),

sustentabilidad y con la articulación universidad-empresa. Asimismo, los tutores de campo tienen en su mayoría relación o vínculo con FRSN, debido a las sostenidas actividades de investigación y extensión, o por ser graduados de la Casa de Altos Estudios y ocupar posiciones estratégicas en la industria local. Como amenazas, las más significativas son la posible disminución de organizaciones postulantes, los cambios en las condiciones del mercado de la zona de influencia, la incertidumbre de la situación económica en Argentina, y la competencia de otras instituciones para realizar PPS. Además, la posibilidad de que los estudiantes queden ligados a la organización, pudiendo no culminar la PPS dejando pendiente la instancia final de presentación del informe y defensa.

### 4.3 Estandarización y mejora el proceso de gestión de PPS

Desde la información, experiencia y datos del contexto y GI, focalizando en la estrategia de reorientación D1-01 como eje de acción, se tomaron las acciones siguientes:
- se revisionaron los procedimientos de PPS enmarcados en la resolución vigente,
- se definieron secuencia y puntos de control, instalando nuevas metodologías de trabajo, utilizando el modelo PHVA y su gestión, compatibilizando acciones desde la gestión de la mejora y de la rutina. (Formento, 2015)

De acuerdo con esta revisión, el proceso de gestión de PPS está integrado por cuatro subprocesos principales denominados: Inicio y Planificación, Desarrollo y Conclusiones, Evaluación y Medición, Análisis y Mejora en un ciclo continuo según se describe en la Figura 3 y que se analizan mediante la herramienta SIPOC en la Tabla 3




*Figura 5: Ciclo de procesos interconectados de PPS. Fuente: elaboración propia.*

Luego de realizar un análisis del proceso y cada subproceso aplicando SIPOC (figura 6), se realizó la descripción del proceso principal y subprocesos derivados de la gestión de PPS.

| **Proveedores** | | **Clientes** |
|---|---|---|
| *¿Quién suministra lo que se necesita para ejecutar el proceso?* | | *¿Qué clientes necesitan la salida de este proceso?* |
| UTN FRSN<br>Depto. Ing. Industrial<br>Organización involucrada<br>Cátedra PPS | | Estudiantes<br>Pymes locales<br>Empresas Multinacionales<br>Grupos de Investigación<br>Departamentos y Centros<br>Región (Municipio y zonas aledañas) |

| **Entradas** | **Proceso** | **Salidas** |
|---|---|---|
| *¿Cuáles son los insumos / recursos requeridos?* | *¿Qué hace el proceso?* | *¿Cuál es el resultado esperado del proceso* |
| Información<br>Tutores<br>Plan de Trabajo | Realizar un diagnóstico ó desarrollo ó diseño ó mejora, en el campo de la industria y/o un servicio, para poner en práctica durante 200 h como mínimo la ingeniería Industrial. | 100% Satisfacción de la empresa<br>Agregado de valor desde la disciplina.<br>Presentación exitosa de resultados obtenidos (Informe / Defensa)<br>Indicadores |

*Figura 6: SIPOC para el proceso de Gestión de PPS. Fuente: Elaboración propia.*

El análisis anterior permitió revisionar información documentada del proceso de gestión, canales de comunicación, y medios de soporte.

### 4.4 Metodología para el relevamiento del contexto en una organización educativa

Los cuatro subprocesos planteados se entienden como actividades interconectadas que tienen relación unas con otras; que ocurren a partir de necesidades y requisitos de partes interesadas produciendo resultados para cumplir requisitos de los usuarios y que se integran con actividades de soporte que permiten agregar valor a su desarrollo. Sus requisitos, flujos de información y resultados, se representan en el esquema de la Figura 7.

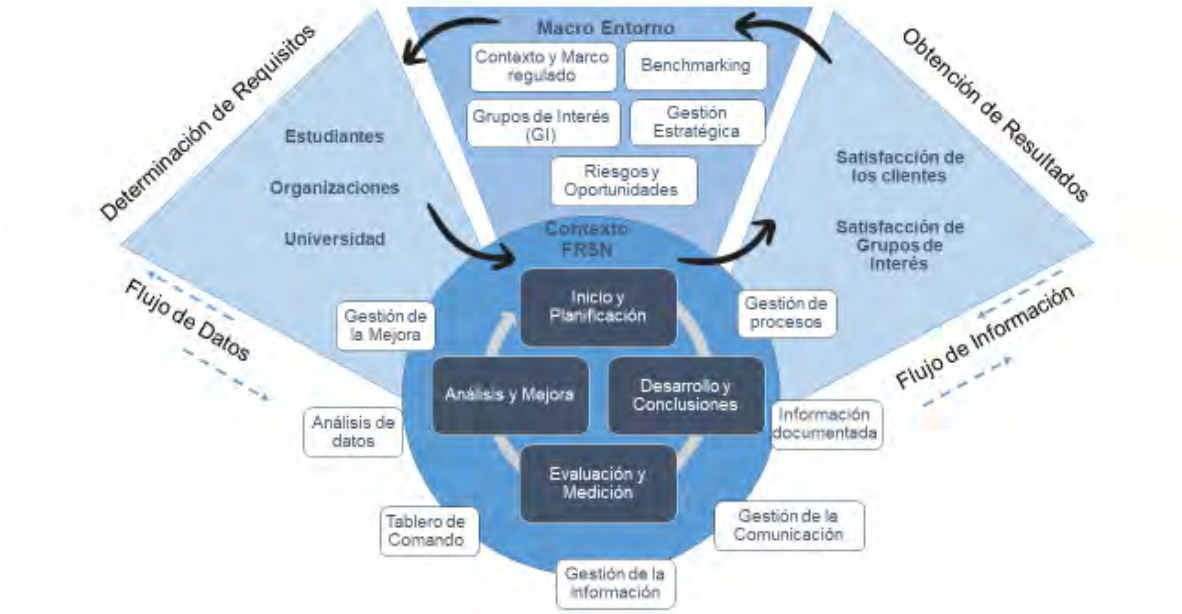



*Figura 7: Metodología para relevar el contexto desde la Gestión del proceso de PPS. Fuente: Elaboración propia.*

El flujo de datos inicia con la identificación de requisitos, a partir de necesidades de los GI que por su valorización se constituyen en informantes clave (Estudiantes, Organizaciones, Universidad), se desarrolla la PPS en sus 4 subprocesos identificados como principales en su ciclo iterativo (Inicio y Planificación, Desarrollo y Conclusiones, Evaluación y Medición, Análisis y Mejora), los cuales se sostienen en subprocesos de apoyo que asisten a los anteriores (Gestión de procesos, Información documentada, Gestión de la comunicación, Gestión de la información, Tablero de Comando, Análisis de Datos, Gestión de la Mejora), para finalizar el flujo de información (datos procesados) buscando resultados de satisfacción del cliente y GI, que serán un elemento de entrada para renovar el ciclo.
Esta información de salida debe contrastarse permanentemente con procesos del macro entorno (Contexto y Marco regulado, Benchmarking, Gestión de GI, Planificación Estratégica, Gestión de Riesgos y Oportunidades), para transformarse en nuevos requisitos y objetivos de calidad del nuevo ciclo.
La frecuencia sistemática de revisión de ciclo debe adaptarse a las características de la organización educativa. Para el caso planteado, se recomienda bianual, de modo de actuar como fuente de información del contexto externo, interno y como nexo de la retroalimentación con GI.
A partir de estas premisas de interpretación y comprensión del contexto interno-externo, y con la visualización de la secuencia en el mapa de los procesos, se identificaron objetivos en la Tabla 4 para operacionalizar la estrategia categorizados en cuatro perspectivas/áreas de acción en el corto plazo basados en el modelo de Tablero de Comando de Kaplan y Norton, (como se citó en Arciénaga et al., 2024) de los cuales se desprenderán indicadores de gestión, actualmente en desarrollo.

*Tabla 4: CMI Estratégico para la gestión de PPS. Fuente: Elaboración Propia*

| Perspectiva o área de Gestión | Objetivos estratégicos | Factores clave del Plan Estratégico |
|---|---|---|
| Procesos técnicos | Aumentar la Calidad en la prestación.<br>Aplicar la Mejora continua en el proceso de PPS | Gestión de plazos<br>Experticia<br>Tutoría<br>Responsabilidad Social Institucional |
| Usuarios | Satisfacer al usuario 100%<br>Aumentar campo de acción (alcance)<br>Mejorar la comunicación | Atención al usuario<br>Comunicación<br>Acceso a la información |

| | | |
|---|---|---|
| Económica - Financiera | N/A por tratarse de un requisito académico que no debe involucrar remuneración, o algún tipo de contraprestación a cambio. | N/A por tratarse de un requisito académico que no debe involucrar remuneración, o algún tipo de contraprestación a cambio. |
| Formación y Aprendizaje | Capacitar al 100% de tutores<br>Autoaprendizaje | Capacitación continua y formación.<br>Redes y articulaciones<br>Aspectos formales (ubicuidad, cumplimiento) |

De este modo, el proceso de gestión de PPS constituye un insumo para la toma de decisiones de la gestión departamental desde la perspectiva estratégica y sostenida desde las partes interesadas referentes, para satisfacer a la sociedad (comunidad, empresas, ONG, organismos científicos, etc.).
El proceso actúa como catalizador de necesidades y constataciones para la retroalimentación de necesidades del entorno y de la organización educativa, en un contexto complejo y de permanente cambio, sin descuidar accesibilidad, Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y oportunidades digitales.
Los próximos pasos serán trabajar en indicadores del proceso, corporativizar la documentación y establecer medios para la experiencia del usuario.

## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo desarrolló una propuesta metodológica para el relevamiento sistemático del contexto interno y externo, así como de las partes interesadas del proceso de gestión de la Práctica Profesional Supervisada (PPS) en la carrera de Ingeniería Industrial de la Facultad Regional San Nicolás (UTN-FRSN). La implementación de esta herramienta permite identificar las necesidades y expectativas de las partes interesadas (consideradas como informantes clave), y también la detección de oportunidades de mejora orientadas a la estandarización y optimización de la gestión del proceso.
Se empleó una metodología mixta, con instrumentos cualitativos y cuantitativos testeados por expertos en una prueba piloto desarrollada entre 2021 y 2024, y herramientas de análisis estratégico como la matriz FODA. Este enfoque permitió identificar fortalezas y debilidades del contexto interno, así como oportunidades asociadas al contexto externo, formulando estrategias de acción y mejora.
La información procesada posibilita realizar ajustes en el servicio educativo y validar permanentemente su alineación con el entorno de actuación, contribuyendo a una gestión más eficiente y coherente con las necesidades de estudiantes, docentes, organizaciones y sociedad. De este modo, se ofrece una herramienta práctica para la toma de decisiones estratégicas centradas en pilares como la formación profesional y la vinculación con la industria y la comunidad. En otras palabras, el análisis del contexto interno del proceso de gestión de la PPS permite responder a las demandas del contexto externo en un ciclo de retroalimentación iterativo.
El trabajo contribuye de manera significativa a la mejora de la calidad del servicio educativo desde la voz del cliente, en un ámbito universitario donde la PPS constituye un espacio de interacción con actores no académicos. Asimismo, establece un marco metodológico replicable para el análisis y la optimización de procesos similares en otros contextos educativos donde la práctica profesional constituye un requisito curricular.
Se abren, además, nuevas líneas de estudio orientadas a la gestión de riesgos y oportunidades, la articulación mediante alianzas estratégicas con empresas, instituciones, escuelas y municipios del entorno o zona de influencia, y el fortalecimiento del compromiso con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la sostenibilidad. También se prevé avanzar en el procesamiento y socialización de resultados mediante herramientas de Inteligencia Artificial (IA), con el propósito de agilizar la obtención y análisis de la información.
Los próximos pasos implican continuar con la medición, sistematización y análisis de los indicadores de gestión (GI), así como avanzar en la definición y despliegue del tablero de comando de la PPS como herramienta estratégica para proveer información sistemática y actualizada que respalde la toma de decisiones.

## 5. REFERENCIAS

Acuña, A. (2012). La gestión de los Stakeholders. Análisis de los diferentes modelos. Encuentro Regional Zona Sur Adenag, 1–13. http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4441

Arciénaga Morales, Antonio A., Villanueva, Bárbara M., Aguerre Pablo E. y Rey, Leonardo G. (2024). Ingeniería Industrial, Empresa y Estrategia. Salta: IIDISA y CUP. ISBN: 978-631-00-4233-6

Burgos Figueroa, Angelo; Ganga Contreras, Francisco; Valdés Montesinos, Michel; (2022) Grupos de interés en la educación superior a distancia. Revista Interciencia. ISSN 0378-1844 Disponible en: https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2022/12/02_6938_A_Ganga_v47n12_7.pdf

Cerruto, M. (2022). La norma ISO 21001:2018 en el sistema de gestión de calidad de las instituciones educativas particulares. Retos de la Ciencia. 6(13). 1-15. https://doi.org/10.53877/rc.6.13.20220701.01

Chafir Diego Fabián, Lecciones de Ingeniería Industrial, Diego Fabián Chafir 1ª ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Autores de Argentina 2022. 250 p. ; 21 x 15 cm. ISBN 978-987-87-2862-9.

Diseño curricular de la carrera Ingeniería industrial. (2022) Ordenanza 1908 del Consejo Superior Universitario de la Universidad Tecnológica Nacional.

Formento, Héctor R. (2015) El proceso de mejora continua: claves para el desarrollo exitoso de las organizaciones. - 1a ed. - Los Polvorines: Universidad Nacional de General Sarmiento, 2015. 224 p.; 21x15 cm. - (Ciencia, innovación y desarrollo) ISBN 978-987-630-205-0

Gallegos, M. L., Cinalli, M., & Hetze, V. (2022). “Herramientas para relevar competencias en la Práctica Profesional Supervisada de Ingeniería Industrial”, 6° Congreso Argentino de Ingeniería (CADI) y 12° Congreso Argentino de Enseñanza de. Buenos Aires, Argentina. Publicado Memorias del Encuentro Argentino de Ingeniería: edición 2022. p. 128-133, ISBN 978-987-4050-08-3

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2020). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. Mcgraw-hill.

Incorporación de la Práctica Profesional Supervisada como exigencia curricular en las carreras de ingeniería, Ordenanza 973 de Consejo Superior Universitario UTN (2003). Res. Comisión Directiva 500/23, año 2023

Masip J (2018) Los grupos de interés y su importancia en la propuesta de valor de las empresas. Boletín Económico de ICE 3096: 47-57

MINISTERIO DE EDUCACIÓN (2021). Resolución 1543. “Estándares para la Acreditación reservadas al título de Ingeniero Industrial”. Buenos Aires, Argentina.

Moscoso Bernal, Santiago & Llamosa, Orlando & Forradelas, Raymundo. (2024). Aplicación de modelos de ingeniería industrial en la educación superior: un enfoque desde la gestión de la calidad y gestión por procesos. South Florida Journal of Development. 5. 452-476. 10.46932/sfjdv5n2-004.

Norma IRAM-ISO 21001 (2018). Organizaciones educativas. Sistemas de gestión para organizaciones educativas. Requisitos con orientación para su uso. Servicios de Educación y Enseñanza (ISO/TC 232)

Norma IRAM-ISO 9001. (2015). Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos. Sistemas de Gestión de la Calidad (ISO/TC 176)

Peña Lapeira, Camilo José; Vargas Puentes Liliana (2020) La práctica profesional, retos y desafíos para el apoyo organizacional. Bogotá: Corporación Universitaria Minuto de Dios. UNIMINUTO, 2020.

Rivera, K. M. y Tupac Yupanqui Bustamante, M. A. (2019). La Norma ISO 21001:2018 – Apéndice normativo y su impacto en estudiantes de educación superior de Lima. INNOVA Research Journal, 4 (3.2), 50-62. https://doi.org/10.33890/innova.v4.n3.2.2019.1190

**Agradecimientos**

Al departamento de Ingeniería Industrial, a los docentes que colaboraron con sus tutorías y al Director del Grupo de Investigación GIMCo.

# OBSERVATORIO PYME TRENQUE LAUQUEN

Rinaldi, Gustavo Adán

*Facultad Regional Trenque Lauquen, Universidad Tecnológica Nacional*
gustavoarinaldi@hotmail.com

**RESUMEN**

La investigación es una continuidad del estudio iniciado en 2020, que buscó analizar el impacto económico de pandemia de COVID 19 y su posterior recuperación en el partido de Trenque Lauquen.

A partir de un muestreo estratificado autogenerado de empresas de los distintos sectores económicos (agropecuario, industrial, comercial y de servicios) del Partido de Trenque Lauquen, se pudo determinar el impacto de la pandemia de COVID 19 en el nivel de actividad del partido y su posterior recuperación. La continuidad de la investigación permitió estimar mensualmente el nivel de actividad económica en el partido y los problemas que deben enfrentar las empresas, como la estrategia para la resolución de los problemas, con la participación del gobierno local, las cámaras empresariales y la Universidad.

La presentación a realizarse para el Congreso COINI 2025, refiere a los resultados de la investigación de Enero de 2019 a Diciembre de 2024.

**Palabras Claves:** Observatorio, Pyme, Local, Regional.

**ABSTRACT**

The research is a continuation of the study initiated in 2020, which sought to analyze the economic impact of the COVID 19 pandemic and its subsequent recovery in the Trenque Lauquen district.

Based on a self-generated stratified sampling of companies from different economic sector (agriculture, industry, commerce, and services) of the Trenque Lauquen district, it was possible to determine the impact of the COVID 19 pandemic on the level of activity in the district and its subsequent recovery. The continuity of the research made it possible to estimate the level of economic activity in the district and the problems faced by the companies, how the strategy for the resolution of the problems, with the participation of the local government, the business chambers and the university, could be applied.

The presentation to be made at the congress COINI 2025, refers to the results of the research from January 2019 to December 2024.

**Keywords:** Observatory, SMEs, district, activity.

## 1 INTRODUCCION

La investigación es una continuidad del estudio iniciado en 2020, que buscó analizar el impacto de la pandemia de COVID 19 y su posterior recuperación en el partido de Trenque Lauquen. Es importante señalizar que los resultados del año 2024, tienen correlación con el inicio en Diciembre de 2023 del gobierno nacional del presidente Dr. Javier Milei.

Vale señalar que a nivel país, durante el año 2020, por efecto de la pandemia de COVID-19, a excepción de los servicios de electricidad, de gas y agua, todos los restantes sectores productivos en los cuales se divide la actividad económica, tuvieron una variación interanual negativa. Pasado ese momento, a mediados del año 2022, la mayoría de los sectores económicos ya operaban con niveles de actividad superiores a los de la pre pandemia. A pesar de ello, comenzó una nueva contracción en las actividades económica que en el año 2023 se estimó en el 1,6% respecto al 2022, y en el año 2024 la contracción fue del 1,8% respecto del 2023, según el Estimador Mensual de Actividades Económicas (EMAE), calculado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). (INDEC. 2020 a 2024)

En la actualidad la investigación cuenta con financiamiento de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) por el período 2024-2025 y se ha podido evaluar el nivel de actividad económica hasta Junio de 2025.

### 1.1 Metodología y Objetivos

El estudio analiza mensualmente desde Enero de 2019 la evolución de las actividades económicas en el partido de Trenque Lauquen, a fin de que los diferentes órganos de gobierno puedan tomar decisiones que mejoren la situación, impactando positivamente en las empresas y en el empleo.

Como se señaló precedentemente, a nivel país, el INDEC calcula mensualmente el EMAE; con esa metodología (INDEC, 2016) el grupo de investigadores de la Facultad Regional Trenque Lauquen de la Universidad Tecnológica Nacional decidió adoptar una metodología similar para inicialmente evaluar el impacto económico de la pandemia de COVID 19 y su posterior recuperación, aunque posteriormente se decidió continuar con esa metodología para realizar una evaluación continua del nivel de actividad económica en el partido de Trenque Lauquen.

En la metodología se utiliza un muestreo estratificado autogenerado donde se seleccionaron empresas, organizaciones y profesionales de consulta de los sectores agropecuarios, industriales, comerciales y de servicios, las cuales desde Enero de 2019 mensualmente nos informan sobre diferentes aspectos económico en sus emprendimientos y del sector que representan, permitiéndonos evaluar su evolución y el impacto que generan en el nivel general de la actividad económica del partido de Trenque Lauquen. Esta evaluación se complementa comparando con la información nacional aportada en los diferentes informes nacionales existentes, muchos de ellos del INDEC.

Los sectores y subsectores evaluados en la investigación son el Sector Agropecuario; el Sector Industrial, diferenciando la elaboración de productos alimenticios y bebidas, la industria de la construcción y las restantes actividades industriales; el Sector Servicios, diferenciando los servicios personales, los profesionales independientes, los servicios relacionados con el esparcimiento, los servicios vehiculares, los servicios financieros y las restantes actividades de servicios y el Sector Comercial, diferenciando el comercio de alimentos, el comercio de productos relacionados con la salud y la limpieza, el comercio de vestimenta, el comercio de productos para el automotor, el comercio de productos generales y las restantes actividades comerciales.

Se tiene el objetivo de poder continuar con la evaluación mensual, permitiendo conocer y transmitir la situación de los distintos sectores económicos del partido de Trenque Lauquen a los dirigentes locales, provinciales y nacionales, a fin de que puedan aplicarse políticas que mejoren la situación empresaria y el empleo. Y que de esta manera la Universidad sea una herramienta de articulación entre las necesidades empresariales y las políticas a implementarse en el distrito.

## 2 SECTOR AGROPECUARIO

Aproximadamente el 25% del Producto Bruto Interno (PBI) nacional corresponde a la cadena agroindustrial. En el partido de Trenque Lauquen, la actividad agropecuaria supera en poco ese nivel de importancia, cercana al 27%. (Pascual y Rinaldi, 1996).

Durante la pandemia, si bien algunos aspectos del sector sufrieron modificaciones, en general no hubo grandes cambios por ser una actividad exenta de restricciones. Lo que sí influyó significativamente ha sido el clima (sequía), los precios internacionales, las reglamentaciones del régimen cambiario, los tributos del comercio internacional y el valor de los insumos. El efecto combinado de estos factores marcó una importante caída en el nivel de la actividad agropecuaria, que se recuperó fuertemente durante el año 2024 con un nivel de actividad un 26% superior al año 2023. (INDEC, 2024)

*Tabla 1 en porcentaje del nivel de actividad del sector agropecuario nacional durante el año 2024 respecto a igual mes del año 2023*

| **Sector Agropecuario** | **Enero'24 a Enero'23** | **Febrero'24 a Febrero'23** | **Marzo'24 a Marzo'23** | **Abril'24 a Abril´23** | **Mayo´24 a Mayo'23** | **Junio´24 a Junio'23** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| En porcentaje | 111,1 | 103,4 | 111,5 | 165,0 | 198,4 | 180,0 |
| **Sector Agropecuario** | **Julio'24 a Julio'23** | **Agosto'24 a Agosto'23** | **Sept.'24 a Sept.'23** | **Oct.'24 a Oct.´23** | **Nov´24 a Nov.'23** | **Dic.´24 a Dic.'23** |
| En porcentaje | 124,7 | 106,2 | 105,2 | 101,7 | 100,9 | 106,7 |

*Ref: Año 2023 base 100 en base al EMAE.* (INDEC, 2023 y 2024)

En el partido de Trenque Lauquen, la situación del sector durante el año 2024 también fue mejor a la del año 2023, aunque con resultados mucho menos significativos. Según los profesionales consultados, el nivel de actividad 2024 fue un 6% superior al año 2023, aunque aún es inferior al año 2019.

## 3 SECTOR INDUSTRIAL

Aproximadamente el 18% del PBI nacional corresponde al sector industrial. En el partido de Trenque Lauquen, poco más del 10% del PBI corresponde a este sector considerando la industria manufacturera y la de la construcción (Pascual y Rinaldi, 1997).

Luego de una leve caída de las actividades por la pandemia de COVID-19, al levantamiento de las restricciones, el sector industrial nacional regresó paulatinamente a un régimen similar a la pre pandemia. Durante el año 2024, el nivel de actividad de la industria manufacturera tuvo una caída del 9,4% respecto al año 2023, encontrándonos con un nivel similar al año 2019 mientras que la industria de la construcción durante el año 2024 una caída del 17,6% respecto del 2023 (INDEC, 2024).

*Tabla 2 en porcentaje del nivel de actividad de la industria manufacturera y de la construcción nacional durante el año 2024 respecto a igual mes del año 2023*

| **Industria** | **Enero'24 a Enero'23** | **Feb.'24 a Feb.'23** | **Marzo'24 a Marzo'23** | **Abril'24 a Abril´23** | **Mayo´24 a Mayo'23** | **Junio´24 a Junio'23** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Manufacturera | 88,7 | 91,7 | 79,8 | 83,6 | 84,5 | 79,3 |
| Construcción | 84,5 | 82,6 | 73,6 | 75,4 | 76,3 | 76,7 |
| **Industria** | **Julio'24 a Julio'23** | **Agos.'24 a Agos.'23** | **Sept.'24 a Sept.'23** | **Oct.'24 a Oct.´23** | **Nov.´24 a Nov.'23** | **Dic.´24 a Dic.'23** |
| Manufacturera | 94,6 | 93,8 | 94,0 | 98,0 | 97,8 | 106,7 |
| Construcción | 87,0 | 83,6 | 85,0 | 85,0 | 85,6 | 92,8 |

*Ref: Meses del año 2023 base 100 en base al EMAE* (INDEC, 2023 y 2024)

Para el análisis sobre la actividad industrial local, además de los datos nacionales obtenidos por informes varios, se consultó a diferentes empresarios y se ha contado con los datos de empresas referentes de los subsectores de elaboración de productos alimenticios y de la industria de la construcción.

### 3.1 Elaboración de productos alimenticios y bebidas (estacional)

Este subsector representa a empresas elaboradoras de alimentos como panificados, bebidas, lácteos, frigoríficos, chacinados, etc., representando a nivel local el 3,7% del PBI. (Pascua y Rinaldi, 1997)

A nivel nacional durante la pandemia de COVID-19, la industria alimenticia fue la menos afectada. Durante el año 2023, este subsector industrial tuvo una caída del 3,6% en el nivel de actividad respecto al año 2022, que se siguió profundizando durante el primer semestre del año 2024 con una contracción de casi el 8% para igual período del año 2023. (INDEC, 2023 y 2024)

*Tabla 3 en porcentaje del nivel de actividad de la industria alimenticia nacional durante el año 2024 respecto a igual mes del año 2023*

| **Industria** | **Enero'24 a Enero'23** | **Feb.'24 a Feb.'23** | **Marzo'24 a Marzo'23** | **Abril'24 a Abril´23** | **Mayo´24 a Mayo'23** | **Junio´24 a Junio'23** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Alimenticia | 93,6 | 98,6 | 85,7 | 91,2 | 93,1 | 91,7 |
| **Industria** | **Julio'24 a Julio'23** | **Agos.'24 a Agos.'23** | **Sept.'24 a Sept'23** | **Oct.'24 a Oct.´23** | **Nov.´24 a Nov.'23** | **Dic.´24 a Dic.'23** |
| Alimenticia | 106,2 | 101,6 | 106,8 | 107,0 | 108,5 | 108,3 |

*Ref: Meses del año 2023 base 100 en base al IPI manufacturero.* (INDEC, 2023 y 2024*)*

*Tabla 4 en porcentaje del nivel de actividad de la elaboración de alimentos y bebidas en Trenque Lauquen*

| **Mes** | **Año 2019** | **Año 2020** | **Año 2021** | **Año 2022** | **Año 2023** | **Año 2024** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 100,0 | 109,2 | 155,4 | 152,8 | 196,4 | 202,9 |
| Febrero | 104,2 | 101,9 | 136,9 | 153,4 | 169,1 | 191,7 |
| Marzo | 56,9 | 121,1 | 152,9 | 166,8 | 190,1 | 210,2 |
| Abril | 52,7 | 109,6 | 142,7 | 158,8 | 182,2 | 202,5 |
| Mayo | 48,4 | 127,4 | 128,0 | 161,7 | 188,5 | 193,6 |
| Junio | 17,3 | 140,1 | 148,4 | 160,4 | 179,0 | 201,0 |
| Julio | 53,0 | 159,9 | 163,0 | 165,9 | 187,9 | 204,1 |
| Agosto | 47,9 | 161,8 | 154,7 | 182,7 | 187,6 | 218,8 |
| Septiembre | 74,3 | 159,2 | 168,1 | 180,8 | 185,0 | 210,8 |
| Octubre | 101,1 | 161,1 | 164,3 | 192,6 | 205,1 | 213,1 |
| Noviembre | 68,1 | 158,0 | 161,7 | 192,3 | 202,9 | 201,3 |
| Diciembre | 100,3 | 163,1 | 152,2 | 190,4 | 202,9 | 201,6 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0.*

A nivel local la elaboración de alimentos, desde el año 2020 de pandemia de COVID-19 tiene un marcado crecimiento. Durante el año 2024 el nivel de actividad fue un 8% superior al de año 2023, un 19% superior al del año 2022, 34% superior al del año 2021, un 55% superior al del año 2020 y un 198% superior al del año 2019.

Estos datos locales muestran una realidad, bastante diferente a la realidad nacional, aunque los niveles de actividad de los dos últimos meses del año 2024 por debajo de iguales meses del año 2023, estarían señalando un posible amesetamiento del subsector local.

### 3.2 Industria de la construcción

Dentro de este subsector de análisis, la empresa seleccionada representa a las empresas de obras civiles y construcciones, constructores, desarrolladores inmobiliarios, etc.

A nivel nacional la industria de la construcción para la determinación del EMAE, tiene una importancia relativa del 3,1% del PBI, contra el 3,6% a nivel local. (Pascual y Rinaldi, 1997)

*Tabla 5 en porcentaje del nivel de actividad de la industria de la construcción nacional durante el año 2024 respecto a igual mes del año 2023*

| Indust. de la construcción | Enero'24 a Enero'23 | Febrero'24 a Febrero'23 | Marzo'24 a Marzo'23 | Abril'24 a Abril´23 | Mayo´24 a Mayo'23 | Junio´24 a Junio'23 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| EMAE | 84,5 | 82,6 | 73,6 | 75,4 | 76,3 | 76,7 |
| **Indust. de la construcción** | **Julio'24 a Julio'23** | **Agosto'24 a Agosto'23** | **Sept.'24 a Sept'23** | **Oct.'24 a Oct.´23** | **Nov.´24 a Nov.'23** | **Dic.´24 a Dic.'23** |
| EMAE | 87,0 | 83,6 | 85,0 | 85,0 | 85,6 | 92,8 |

*Ref: Meses del año 2023 base 100, en base al EMAE* (INDEC, 2023 y 2024)

Como se señaló precedentemente, según el EMAE, la industria de la construcción durante el año 2024, tuvo un nivel de actividad un 17,6% inferior respecto del 2023. (INDEC, 2024).

*Tabla 6 en porcentaje del nivel de actividad de la industria de la construcción en Trenque Lauquen*

| Mes | Año 2019 | Año 2020 | Año 2021 | Año 2022 | Año 2023 | Año 2024 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 100,0 | 41,6 | 70,5 | 146,9 | 44,0 | 32,8 |
| Febrero | 84,9 | 60,6 | 45,6 | 104,7 | 34,3 | 26,4 |
| Marzo | 120,5 | 36,1 | 81,1 | 157,4 | 41,8 | 32,1 |
| Abril | 75,6 | 32,4 | 93,2 | 95,4 | 49,7 | 30,2 |
| Mayo | 75,4 | 56,8 | 77,8 | 93,8 | 51,2 | 36,9 |
| Junio | 46,7 | 60,0 | 101,7 | 79,8 | 90,2 | 42,5 |
| Julio | 93,3 | 62,2 | 112,1 | 63,1 | 36,7 | 34,3 |
| Agosto | 66,8 | 76,4 | 156,7 | 70,7 | 60,7 | 30,2 |
| Septiembre | 46,0 | 71,9 | 120,8 | 73,1 | 62,4 | 43,9 |
| Octubre | 87,3 | 118,5 | 131,2 | 59,3 | 33,0 | 54,3 |
| Noviembre | 48,3 | 79,3 | 120,9 | 53,3 | 41,1 | 52,2 |
| Diciembre | 44,3 | 91,2 | 124,1 | 34,3 | 47,1 | 34,3 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0*

A nivel local, el subsector de la construcción durante el año 2024 tuvo en el nivel de actividad, una contracción superior a la nacional, del 34% respecto al nivel del año 2023, del 56% respecto de la del año 2022 y del 64% respecto de la del año 2021. Esto muestra una actualidad, con un subsector con un nivel de actividad inferior al nivel del año 2020 durante la pandemia de COVID-19.

### 3.3 Restantes subsectores de la industria

Para estimar la situación local de los restantes subsectores industriales (3,1% del PBI local), se considerará lo ocurrido a nivel nacional con el sector. A nivel local este subsector, incluye a industrias textiles, metalmecánicas, industrias de la madera, etc.

Durante el año 2024, el nivel de actividad de la industria manufacturera nacional fue un 9,4% inferior respecto al año 2023, encontrándonos con un nivel similar al año 2019. (INDEC, 2024)

## 4 SECTOR SERVICIOS

Poco más de 50% del PBI nacional corresponde al sector servicios, mientras que en el partido de Trenque Lauquen, poco más del 35% del PBI corresponde a este sector. (Pascual y Rinaldi,1997)

En el país, durante el año 2024 el sector servicios tuvo un nivel de actividad menor al del año 2023, aunque se mantuvo en los servicios relacionados con la administración pública y la enseñanza. (INDEC, 2024)

*Tabla 7 en porcentaje del nivel de actividad de los subsectores servicios nacionales más significativos durante el año 2024 respecto a igual mes del año 2023*

| Servicios | Enero'24 a Enero'23 | Febrero'24 a Febrero'23 | Marzo'24 a Marzo'23 | Abril'24 a Abril´23 | Mayo´24 a Mayo'23 | Junio´24 a Junio'23 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Adm públ | 101,0 | 100,8 | 99,9 | 99,5 | 99,1 | 98,8 |
| Enseñanza | 102,0 | 102,1 | 101,1 | 100,9 | 101,0 | 101,0 |
| **Servicios** | **Julio'24 a Julio'23** | **Agosto'24 a Agosto'23** | **Sept.'24 a Sept.'23** | **Oct.'24 a Oct.´23** | **Nov.´24 a Nov.'23** | **Dic.´24 a Dic.'23** |
| Adm públ | 98,7 | 98,5 | 98,1 | 97,9 | 97,8 | 97,6 |
| Enseñanza | 100,9 | 100,8 | 100,6 | 101,0 | 101,3 | 101,1 |

*Ref: Meses del año 2023 base 100 en base al EMAE* (INDEC, 2023 y 2024)

A nivel local al sector de servicios, se lo analizó a partir de los servicios personales, los profesionales, los servicios relacionados con el esparcimiento, los servicios vehiculares y los servicios monetarios.

### 4.1 Servicios personales

La empresa representa a peluquerías, gimnasios, etc.; el 1,9% del PBI local. (Pascual, Rinaldi, 1997)

*Tabla 8 en porcentaje del nivel de actividad de los servicios personales en Trenque Lauquen*

| Mes | Año 2019 | Año 2020 | Año 2021 | Año 2022 | Año 2023 | Año 2024 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 100,0 | 91,4 | 68,6 | 102,8 | 105,7 | 102,8 |
| Febrero | 102,8 | 100,0 | 68,6 | 108,6 | 111,4 | 108,6 |
| Marzo | 142,8 | 0,0 | 88,6 | 117,1 | 134,3 | 122,8 |
| Abril | 157,1 | 0,0 | 94,3 | 134,3 | 145,7 | 117,1 |
| Mayo | 165,7 | 42,8 | 105,7 | 134,3 | 140,0 | 114,3 |
| Junio | 180,0 | 82,8 | 111,4 | 137,1 | 131,4 | 108,6 |
| Julio | 177,1 | 77,1 | 117,1 | 131,4 | 128,6 | 97,1 |
| Agosto | 177,1 | 80,0 | 91,4 | 140,0 | 143,3 | 94,3 |
| Septiembre | 180,0 | 80,0 | 111,4 | 140,0 | 114,3 | 94,3 |
| Octubre | 174,2 | 88,6 | 120,0 | 142,8 | 111,4 | 91,4 |
| Noviembre | 174,2 | 94,3 | 134,3 | 151,4 | 100,0 | 88,6 |
| Diciembre | 171,4 | 102,8 | 125,7 | 145,7 | 97,1 | 54,3 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0*

Durante el año 2024 estos servicios tuvieron un nivel de actividad un 18% inferior al del año 2023.

### 4.2 Profesiones independientes

Dentro de este subsector se incluye a los profesionales y técnicos que a nivel país, representan al 5,5% de los ocupados, mientras que. a nivel local representan el 4,3% del PBI. (Pascual y Rinaldi.1997)

*Tabla 9 en porcentaje del nivel de actividad de las profesiones independientes en Trenque Lauquen*

| Mes | Año 2019 | Año 2020 | Año 2021 | Año 2022 | Año 2023 | Año 2024 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 100,0 | 47,8 | 54,3 | 39,1 | 26,1 | 17,4 |
| Febrero | 73,9 | 45,6 | 93,4 | 41,3 | 65,2 | 45,7 |
| Marzo | 143,5 | 71,7 | 180,4 | 95,6 | 50,0 | 60,9 |
| Abril | 67,4 | 17,4 | 34,8 | 41,3 | 63,0 | 54,3 |
| Mayo | 67,4 | 17,4 | 87,0 | 39,1 | 23,9 | 54,3 |
| Junio | 108,7 | 71,7 | 80,4 | 50,0 | 19,6 | 45,7 |
| Julio | 80,4 | 89,1 | 45,7 | 34,7 | 52,2 | 32,6 |
| Agosto | 158,7 | 63,0 | 56,5 | 67,4 | 71,7 | 36,9 |
| Septiembre | 139,1 | 156,5 | 56,5 | 108,7 | 76,1 | 60,9 |
| Octubre | 69,6 | 91,3 | 134,8 | 39,1 | 91,3 | 23,9 |
| Noviembre | 54,3 | 67,4 | 32,6 | 36,9 | 34,7 | 58,7 |
| Diciembre | 36,9 | 58,7 | 23,9 | 32,6 | 30,4 | 37,0 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0*

El análisis local muestra que, durante el año 2024 la caída fue del 13% en el nivel de actividad.

### 4.3 Servicios relacionados con el esparcimiento

Dentro de este subsector de análisis, la empresa seleccionada representa a los restaurantes, bares, hoteles, etc., que a nivel nacional tiene una importancia del 1,4% del PBI, contra el 1% a nivel local. (Pascual y Rinaldi. 1997)

*Tabla 10 en porcentaje del nivel de actividad de los servicios de esparcimiento en Trenque Lauquen*

| Mes | Año 2019 | Año 2020 | Año 2021 | Año 2022 | Año 2023 | Año 2024 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 100,0 | 106,8 | 110,4 | 142,2 | 161,7 | 117,2 |
| Febrero | 104,4 | 110,0 | 81,7 | 133,6 | 126,5 | 77,5 |
| Marzo | 79,8 | 41,1 | 63,2 | 104,6 | 98,7 | 60,2 |
| Abril | 71,3 | 0,0 | 34,6 | 94,3 | 113,7 | 63,2 |
| Mayo | 87,0 | 0,1 | 21,4 | 84,1 | 108,6 | 72,0 |
| Junio | 90,8 | 16,0 | 28,6 | 96,0 | 90,3 | 56,2 |
| Julio | 114,4 | 15,6 | 86,1 | 127,0 | 147,3 | 92,6 |
| Agosto | 47,7 | 16,4 | 66,1 | 85,8 | 90,7 | 67,4 |
| Septiembre | 47,7 | 16,0 | 87,1 | 93,8 | 87,3 | 88,0 |
| Octubre | 68,7 | 14,3 | 92,0 | 105,0 | 92,4 | 80,1 |
| Noviembre | 87,3 | 25,0 | 85,3 | 103,4 | 68,0 | 92,0 |
| Diciembre | 85,1 | 56,3 | 95,9 | 96,0 | 81,3 | 75,4 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0*

Durante el año 2024, el nivel de actividad del subsector local fue un 26% inferior al de los años 2023.

### 4.4 Servicios vehiculares

Dentro de este subsector de análisis, la empresa seleccionada representa a mecánicos de vehículos automotores, chapistas, reparación de motores, etc., que, a nivel local, este representa el 2,7% del PBI. (Pascual y Rinaldi. 1997)

*Tabla 11 en porcentaje del nivel de actividad de los servicios vehiculares en Trenque Lauquen*

| Mes | Año 2019 | Año 2020 | Año 2021 | Año 2022 | Año 2023 | Año 2024 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 100,0 | 97,8 | 73,0 | 66,4 | 84,7 | 51,9 |
| Febrero | 62,2 | 55,7 | 65,9 | 54,0 | 56,7 | 39,2 |
| Marzo | 47,9 | 30,6 | 56,9 | 44,9 | 41,5 | 36,9 |
| Abril | 51,1 | 8,8 | 29,5 | 56,9 | 35,5 | 35,1 |
| Mayo | 45,8 | 19,7 | 30,3 | 31,8 | 34,7 | 35,1 |
| Junio | 42,2 | 29,0 | 25,4 | 35,0 | 33,5 | 35,0 |
| Julio | 52,6 | 32,8 | 38,5 | 41,0 | 41,5 | 73,8 |
| Agosto | 44,8 | 28,9 | 50,8 | 39,6 | 40,9 | 40,9 |
| Septiembre | 50,3 | 33,0 | 50,8 | 38,7 | 41,1 | 31,9 |
| Octubre | 48,6 | 43,4 | 49,4 | 44,9 | 40,9 | 36,9 |
| Noviembre | 48,9 | 55,3 | 54,9 | 50,1 | 38,5 | 33,9 |
| Diciembre | 59,7 | 59,1 | 58,7 | 63,2 | 40,4 | 47,0 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0*

El análisis local muestra que, desde el año 2021 el nivel de actividad de este subsector viene cayendo de forma significativa. Durante el año 2024 el nivel fue un 6% inferior al año 2023.

### 4.5 Servicios financieros

La empresa seleccionada representa a actividades bancarias, seguros, etc., que a nivel nacional tiene una importancia relativa del 3,1% del PBI, contra el 2,2% a nivel local. (Pascual y Rinaldi. 1997)

*Tabla 12 en porcentaje del nivel de actividad de los servicios monetarios en Trenque Lauquen*

| Mes | Año 2019 | Año 2020 | Año 2021 | Año 2022 | Año 2023 | Año 2024 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 100,0 | 110,0 | 139,8 | 114,4 | 83,7 | 106,6 |
| Febrero | 93,3 | 85,5 | 87,9 | 109,9 | 86,1 | 99,5 |
| Marzo | 104,7 | 88,9 | 81,5 | 106,6 | 90,3 | 98,8 |
| Abril | 85,2 | 89,8 | 84,0 | 104,5 | 90,9 | 96,9 |
| Mayo | 98,7 | 76,4 | 106,6 | 106,5 | 90,8 | 101,8 |
| Junio | 133,0 | 144,9 | 78,9 | 108,1 | 90,3 | 99,6 |
| Julio | 92,2 | 116,8 | 82,8 | 99,2 | 90,8 | 97,1 |
| Agosto | 93,1 | 100,4 | 90,5 | 96,2 | 87,5 | 123,5 |
| Septiembre | 90,6 | 98,8 | 91,6 | 94,4 | 84,5 | 98,8 |
| Octubre | 95,8 | 96,6 | 95,7 | 89,7 | 84,5 | 103,6 |
| Noviembre | 93,8 | 96,9 | 100,1 | 84,4 | 84,4 | 110,2 |
| Diciembre | 140,7 | 144,0 | 105,0 | 82,2 | 85,2 | 114,3 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0*

A nivel local, durante el año 2024 el nivel de actividad fue un 19% superior al del año 2023.

### 4.6 Restantes actividades de servicio

Las restantes actividades de servicios en el partido de Trenque Lauquen, en su mayoría están relacionadas con la administración pública general (municipal, provincial y nacional), con la enseñanza y con las actividades de orden público.

Según el INDEC, a nivel nacional estos servicios tienen una importancia relativa del 7,9% del PBI, contra el 23,4% a nivel local. (Pascual y Rinaldi. 1996 y 1997)

## 5 SECTOR COMERCIAL

A nivel nacional según el INDEC, el sector comercial tiene una importancia del 12,4% del PBI, contra el 26,6% a nivel local. (Pascual y Rinaldi.1996). Durante el año 2024 a nivel nacional la actividad comercial tuvo una contracción del 7,6% respecto al año 2023. (INDEC. 2024)

*Tabla 13 en porcentaje del nivel de actividad comercial durante el año 2024 respecto a igual mes del año 2023*

| Comercio | Enero'24 a Enero'23 | Feb.'24 a Feb.'23 | Marzo'24 a Marzo'23 | Abril'24 a Abril´23 | Mayo´24 a Mayo'23 | Junio´24 a Junio'23 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Com min/may | 92,6 | 95,6 | 84,7 | 85,1 | 86,8 | 80,9 |
| **Comercio** | **Julio'24 a Julio'23** | **Agos.'24 a Agos.'23** | **Sept.'24 a Sept.'23** | **Oct.'24 a Oct.´23** | **Nov.´24 a Nov.'23** | **Dic.´24 a Dic.'23** |
| Com min/may | 94,9 | 93,1 | 93,7 | 98,9 | 99,4 | 107,4 |

*Ref: Meses del año 2023 base 100,0.* (INDEC. 2024)

El sector comercial local, se analizó por la comercialización de alimentos, de productos de la salud y la limpieza, la comercialización de ropa, de productos para el automotor y la venta de artículos generales.

### 5.1 Comercios de alimentos

En este subsector la empresa seleccionada representa a los distribuidores de alimentos, almacenes, carnicerías, fruterías, etc., que, a nivel local representa el 2,5% del PBI. (Pascual y Rinaldi. 1997)

*Tabla 14 en porcentaje del nivel de actividad de los comercios de alimentos en Trenque Lauquen*

| Mes | Año 2019 | Año 2020 | Año 2021 | Año 2022 | Año 2023 | Año 2024 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 100,0 | 103,1 | 116,8 | 122,3 | 120,7 | 103,2 |
| Febrero | 98,3 | 92,2 | 118,8 | 134,5 | 133,7 | 107,5 |
| Marzo | 100,7 | 130,8 | 141,4 | 160,8 | 168,2 | 111,6 |
| Abril | 105,0 | 161,2 | 131,5 | 131,8 | 144,1 | 111,3 |
| Mayo | 103,3 | 126,1 | 118,9 | 145,2 | 145,1 | 127,5 |
| Junio | 85,2 | 121,0 | 132,5 | 133,8 | 131,5 | 104,3 |
| Julio | 107,2 | 125,8 | 134,6 | 123,9 | 113,0 | 129,2 |
| Agosto | 113,3 | 127,5 | 117,2 | 140,6 | 144,9 | 100,2 |
| Septiembre | 115,9 | 127,0 | 135,0 | 130,1 | 117,4 | 101,0 |
| Octubre | 118,3 | 127,8 | 129,4 | 132,6 | 135,6 | 126,6 |
| Noviembre | 115,7 | 117,5 | 136,9 | 134,6 | 128,8 | 115,3 |
| Diciembre | 126,1 | 128,8 | 141,2 | 146,2 | 111,0 | 119,2 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0*

Al análisis local muestra un nivel de actividad durante el año 2024, un 15% inferior al del año 2023.

### 5.2 Comercio de productos relacionados con la salud y limpieza

En este subsector de análisis, la empresa seleccionada representa a las farmacias, venta de productos de limpieza, perfumerías, etc., que, a nivel local, representa el 0,3% del PBI. (Pascual y Rinaldi. 1997)

*Tabla 15 en porcentaje del nivel de actividad de los comercios de productos relacionados con la salud y la limpieza en Trenque Lauquen*

| Mes | Año 2019 | Año 2020 | Año 2021 | Año 2022 | Año 2023 | Año 2024 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 48,4 | 91,6 | 155,0 | 127,9 | 133,0 | 1,0 |
| Febrero | 100,0 | 100,2 | 143,9 | 117,4 | 109,3 | 69,1 |
| Marzo | 108,7 | 124,7 | 186,6 | 125,7 | 119,6 | 101,0 |
| Abril | 104,3 | 107,3 | 140,8 | 113,7 | 153,6 | 87,6 |
| Mayo | 86,4 | 114,1 | 125,5 | 118,0 | 145,4 | 81,4 |
| Junio | 77,2 | 108,0 | 110,7 | 121,7 | 157,7 | 149,5 |
| Julio | 108,9 | 132,1 | 119,2 | 147,4 | 126,8 | 174,2 |
| Agosto | 74,7 | 119,3 | 128,7 | 115,0 | 66,0 | 152,6 |
| Septiembre | 77,3 | 91,5 | 125,7 | 122,2 | 143,3 | 176,3 |
| Octubre | 108,1 | 115,6 | 115,9 | 110,9 | 158,8 | 177,3 |
| Noviembre | 77,1 | 109,1 | 116,2 | 122,8 | 55,7 | 143,3 |
| Diciembre | 90,7 | 152,9 | 155,3 | 132,2 | 257,7 | 111,3 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0*

Durante el 2024, a pesar de las variaciones mensuales el nivel de actividad ha sido similar al año 2023.

### 5.3 Comercio de vestimenta

Dentro de este subsector de análisis, la empresa seleccionada representa a tiendas, zapaterías, venta de artículos deportivos, etc., que a nivel local representa el 2,1% del PBI. (Pascual y Rinaldi. 1997)

*Tabla 16 en porcentaje del nivel de actividad de los comercios de vestimenta en Trenque Lauquen*

| Mes | Año 2019 | Año 2020 | Año 2021 | Año 2022 | Año 2023 | Año 2024 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 100,0 | 102,4 | 86,7 | 63,3 | 59,5 | 102,6 |
| Febrero | 96,5 | 105,1 | 80,1 | 77,7 | 47,9 | 55,5 |
| Marzo | 98,7 | 25,6 | 88,0 | 83,5 | 126,8 | 130,0 |
| Abril | 72,4 | 0,0 | 89,2 | 117,2 | 163,1 | 146,2 |
| Mayo | 77,1 | 17,0 | 45,7 | 121,1 | 88,0 | 102,0 |
| Junio | 92,8 | 46,3 | 121,5 | 178,1 | 149,4 | 134,1 |
| Julio | 113,6 | 82,1 | 91,6 | 131,2 | 243,7 | 124,9 |
| Agosto | 88,3 | 44,0 | 74,8 | 193,2 | 129,7 | 169,6 |
| Septiembre | 97,5 | 52,3 | 108,2 | 148,0 | 159,3 | 184,6 |
| Octubre | 90,2 | 61,7 | 73,9 | 136,6 | 104,4 | 69,1 |
| Noviembre | 103,2 | 92,8 | 100,0 | 146,1 | 173,4 | 118,7 |
| Diciembre | 125,7 | 102,9 | 224,0 | 235,8 | 251,6 | 152,9 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0*

Durante el año 2024, el nivel de actividad fue un 12% inferior al del año 2023.

### 5.4 Comercio de productos para el automotor

En este subsector la empresa seleccionada representa a la venta de vehículos y repuestos, a las estaciones de servicios, etc., que, a nivel local representa el 2,7% del PBI. (Pascual y Rinaldi. 1997)

*Tabla 17 en porcentaje del nivel de actividad de los comercios de productos para el automotor en Trenque Lauquen*

| Mes | Año 2019 | Año 2020 | Año 2021 | Año 2022 | Año 2023 | Año 2024 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 100,0 | 103,3 | 89,8 | 80,4 | 80,4 | 70,0 |
| Febrero | 94,2 | 99,8 | 87,6 | 81,7 | 74,5 | 65,6 |
| Marzo | 111,0 | 86,0 | 108,1 | 97,1 | 90,4 | 75,4 |
| Abril | 115,8 | 56,8 | 99,4 | 96,9 | 84,4 | 75,1 |
| Mayo | 125,3 | 83,5 | 95,9 | 95,7 | 86,4 | 88,7 |
| Junio | 117,2 | 96,0 | 92,7 | 97,0 | 84,9 | 74,2 |
| Julio | 115,4 | 104,4 | 103,7 | 102,5 | 83,0 | 79,1 |
| Agosto | 124,7 | 100,5 | 103,4 | 102,8 | 84,9 | 78,1 |
| Septiembre | 119,1 | 86,6 | 107,9 | 95,3 | 81,3 | 70,0 |
| Octubre | 121,0 | 101,7 | 110,5 | 94,9 | 85,3 | 73,1 |
| Noviembre | 114,9 | 94,6 | 103,6 | 90,2 | 78,5 | 70,1 |
| Diciembre | 117,4 | 100,9 | 99,7 | 90,2 | 82,8 | 69,0 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0*

Durante el año 2024 se comercializó el 11% menos que en el año 2023.

### 5.5 Comercio de productos generales

En este subsector de análisis, la empresa seleccionada representa a kioscos, librerías, fotocopiadoras, etc., que, a nivel local, este subsector representa el 0,9% del PBI. (Pascual y Rinaldi.1997)

*Tabla 18 en porcentaje del nivel de actividad de los comercios de productos generales en Trenque Lauquen*

| Mes | Año 2019 | Año 2020 | Año 2021 | Año 2022 | Año 2023 | Año 2024 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enero | 100,0 | 102,3 | 125,1 | 108,6 | 107,3 | 82,2 |
| Febrero | 98,6 | 115,4 | 136,4 | 119,6 | 112,9 | 83,3 |
| Marzo | 125,9 | 90,3 | 137,4 | 129,7 | 129,1 | 102,6 |
| Abril | 116,9 | 77,0 | 115,0 | 107,3 | 110,2 | 88.0 |
| Mayo | 114,0 | 63,4 | 119,8 | 116,6 | 120,4 | 98,7 |
| Junio | 110,5 | 96,4 | 125,4 | 118,5 | 112,3 | 105,0 |
| Julio | 116,1 | 101,8 | 136,6 | 115,1 | 122,9 | 113,9 |
| Agosto | 112,4 | 119,4 | 146,1 | 123,1 | 116,6 | 118,4 |
| Septiembre | 106,9 | 118,2 | 124,1 | 119,1 | 113,1 | 126,0 |
| Octubre | 111,2 | 130,8 | 133,3 | 118,6 | 125,8 | 119,8 |
| Noviembre | 99,5 | 125,8 | 120,6 | 113,4 | 103,0 | 104,2 |
| Diciembre | 106,9 | 144,5 | 133,8 | 114,2 | 100,6 | 133,1 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0*

Durante el año 2024 a nivel local el subsector tuvo un nivel de actividad un 7% inferior al año 2023.

### 5.6 Restantes subsectores comerciales

Los restantes subsectores comerciales, que a nivel local representan el 18,1% del PBI (Pascual y Rinaldi. 1997), se considera que tuvieron una caída del 7,6% en el nivel de actividad durante el año 2024 respecto del año 2023. (INDEC. 2024)

## 6 VARIACION MENSUAL EN EL NIVEL DE ACTIVIDAD

Considerando la distribución del Valor Agregado en el partido de Trenque Lauquen por subsector y el índice de actividad de cada uno de ellos, se pudo estimar el nivel de actividad mensual general.

*Tabla 19 en porcentaje del estimador mensual del nivel de actividad económica en el partido de Trenque Lauquen.*

| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **2019** | 100,0 | 97,1 | 100,9 | 95,2 | 95,8 | 95,9 | 98,4 | 99,5 | 99,1 | 98,8 | 95,5 | 98,0 |
| **2020** | 96,4 | 93,3 | 79,5 | 76,1 | 86,7 | 93,4 | 95,7 | 93,9 | 97,4 | 97,5 | 95,7 | 98,5 |
| **2021** | 97,5 | 97,3 | 104,1 | 96,3 | 96,7 | 99,3 | 98,4 | 99,3 | 100,2 | 103,2 | 99,2 | 100,8 |
| **2022** | 100,2 | 99,2 | 104,7 | 100,1 | 99,8 | 101,0 | 95,6 | 99,2 | 99,6 | 96,6 | 96,5 | 97,2 |
| **2023** | 96,1 | 95,4 | 98,8 | 99,5 | 96,5 | 97,8 | 99,2 | 98,8 | 98,3 | 98,2 | 96,0 | 97,2 |
| **2024** | 94,6 | 94,0 | 95,1 | 94,6 | 95,0 | 93,3 | 97,4 | 97,1 | 97,5 | 96,3 | 97,9 | 98,7 |

*Ref: Enero de 2019 base 100,0*

## 7 CONCLUSIONES

Con el nivel de actividad de los sectores locales y con los datos aportados por el INDEC, y los profesionales asesores, se ha podido estimar que, a nivel local, en el año 2020 el nivel de actividad cayó un 6,0% respecto al año 2019, que en el año 2021 se recuperó fuertemente un 8,0%, pero que a partir del año 2022 el nivel de actividad viene cayendo respecto al año anterior. Cayó el 0,2% en 2022 respecto a 2021, cayó el 1,5% en el año 2023 respecto del año 2022 y cayó el 1,7% en el año 2024 respecto del año 2023.

Al realizar un análisis mes a mes del año 2024 a nivel nacional y local (coincidiendo con el gobierno del Presidente Milei), se observa, que en el país hubo una fuerte caída durante los primeros meses del año en el nivel de actividad con una lenta recuperación que fue mejorando a fin de año, mientras que, en el partido, aunque la caída inicial fue menos pronunciada, la recuperación también fue más lenta.

Es importante mencionar que este trabajo de investigación, ha permitido establecer una importante relación del grupo de investigadores con las empresas y los profesionales representativos de los sectores económicos, los que también han brindado información cualitativa. Con esta información se han confeccionados distintos documentos que han sido presentados a las autoridades municipales, y a las cámaras empresariales, para que en conjunto podamos implementar acciones que mejoren las perspectivas económicas del partido de Trenque Lauquen.

Por otro lado, si bien por razones particulares, la investigación cuenta con poco apoyo de la Universidad Tecnológica Nacional, se tiene total apoyo de la Municipalidad de Trenque Lauquen y de las Cámaras Empresariales locales e incluso la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), ha asignado recursos por el período 2024-2025 para la concreción de las actividades previstas en la investigación. Esto facilita continuar con la investigación durante el año 2025, con la idea de además continuar durante los próximos años, en virtud de que consideramos de que las actividades y resultados son insumos válidos para encontrar soluciones locales a los problemas que enfrentan los sectores productivos y las empresas del partido.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS


- Pascual, E. y Rinaldi, G. (1996 y 1997). Análisis de Situación y Perspectivas para el Desarrollo del Partido de Trenque Lauquen - Primer Parte. El Sector Agropecuario y Segunda Parte. Economía Urbana. Municipalidad de Trenque Lauquen UATL UTN

- INDEC (2016). Metodología del Estimador Mensual de Actividades Económica (EMAE) (Metodología INDEC N° 20)
- INDEC (2019, 2020, 2021, 2022, 2023 y 2024). *Informe Técnico: Estimador Mensual de la Actividad Económica* (Vol.4 N°31 Dic. 2019, Vol.5 N°34 Dic. 2020, Vol.6 N°32 Dic. 2021, Vol.7 N°33 Dic. 2022 y Vol.8 N°40 Dic. 2023, Vol.8 N°161 Mayo 2024, Vol.8 N°187 Junio 2024 y Vol.9 N°41 Dic. 2024)
- INDEC (2023 y 2024). *Informe Técnico Industria Manufacturera - Indice de producción industrial manufacturera* (Vol.7 N°185, Jul. 2023, Vol.8 N°176, Jun. 2024 y Vol.9 N°25, Dic. 2024)
- INDEC (2024). Informe Técnico Construcción - Indice de coyuntura de la actividad de la construcción (Vol.8 N°150, May. 2024)
- INDEC (2024). Informes Técnicos Servicios – Indicador Sintético de Servicios Públicos (Vol.8 N°279, Sep. 2024)



**Agradecimientos**

El autor de este trabajo desea agradecer a los empresarios y profesionales que mes a mes brindan sus datos, a la Municipalidad de Trenque Lauquen que ha apoyado el proyecto desde su inicio y a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires que ha brindado el financiamiento período 2024/2025

# REVISIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD EN EMPRESAS DE SERVICIOS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE.

Hetze, Vanesa

*Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional.*
*vhetze@frsn.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

El Despliegue de la Función Calidad (QFD, por sus siglas en inglés) es una metodología sistemática que traduce las necesidades y expectativas del cliente en especificaciones técnicas y operativas, permitiendo a las empresas de servicios alinear sus procesos internos con la voz del cliente. Esta herramienta, conocida como la casa de la calidad por su representación matricial, facilita la priorización de los atributos más valorados por los usuarios y su integración en el diseño y la gestión del servicio, promoviendo la colaboración multidisciplinar y la mejora continua. En el sector servicios, donde la percepción del cliente es fundamental, la implementación de QFD contribuye a reducir tiempos de desarrollo, optimizar recursos y elevar la satisfacción del usuario final, además de fortalecer la competitividad mediante la identificación de oportunidades de mejora frente a la competencia.

La presente revisión bibliográfica se realizó siguiendo una metodología estructurada en tres fases principales. Primero, se definió claramente el problema de investigación, estableciendo la relevancia de analizar la importancia del QFD en empresas de servicios de América Latina y el Caribe y delimitando el alcance temático. En la segunda fase, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de información en bases de datos académicas, libros y artículos científicos, empleando criterios rigurosos de selección para asegurar la calidad y pertinencia de las fuentes consultadas. Finalmente, se procedió a la organización y análisis crítico de la literatura recopilada, sintetizando los hallazgos más relevantes y estableciendo conexiones entre los distintos enfoques y resultados reportados en la bibliografía. Esta metodología garantiza la trazabilidad, transparencia y rigor en la construcción del estado del arte sobre la aplicación y beneficios del QFD en el sector servicios en América Latina y el Caribe, aportando una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

**Palabras Claves:** QFD, Calidad, Empresas de servicios.

**ABSTRACT**

**Quality Function Deployment (QFD)** is a systematic that translates customer needs and expectations into technical and operational specifications, enabling service companies to align their internal processes with the voice of the customer. This tool, known as the *House of Quality* due to its matrix representation, facilitates the prioritization of the attributes most valued by users and their integration into service design and management, promoting multidisciplinary collaboration and continuous improvement. In the service sector, where customer perception is crucial, implementing QFD helps reduce development time, optimize resources, and enhance end-user satisfaction, while also strengthening competitiveness by identifying opportunities for improvement relative to competitors.

This literature review was conducted following a structured methodology in three main phases. First, the research problem was clearly defined, establishing the relevance of analyzing the importance of QFD in service companies in Latin America and the Caribbean, and delimiting the thematic scope. In the second phase, an exhaustive search for information was carried out in academic databases, books, and scientific articles, using rigorous selection criteria to ensure the quality and relevance of the sources consulted. Finally, the collected literature was organized and critically analyzed, synthesizing the most relevant findings and establishing connections between the different approaches and results reported in the bibliography. This methodology ensures traceability, transparency, and rigor in building the state

of the art on the application and benefits of QFD in the service sector in Latin America and the Caribbean, providing a solid foundation for future research and practical applications.

**Keywords:** QFD, Quality, Service companies

## 1. INTRODUCCIÓN

En un mundo empresarial que se vuelve cada vez más competitivo y enfocado en la satisfacción del cliente, las organizaciones de servicios se enfrentan al desafío de ajustar sus procesos para responder de manera efectiva a las necesidades y expectativas de los usuarios. En este escenario, el Despliegue de la Función Calidad (QFD, por sus siglas en inglés) ha surgido como una herramienta fundamental que ayuda a convertir la voz del cliente en especificaciones técnicas y operativas precisas, facilitando, además, la mejora continua y la gestión integrada del servicio. Conocida por su representación en forma de matriz, llamada también la "casa de la calidad", esta metodología fomenta la colaboración entre diferentes disciplinas y optimiza recursos, lo que contribuye a reducir los tiempos de desarrollo y a fortalecer la competitividad en el sector servicios.

Este trabajo presenta una revisión bibliográfica sistemática sobre la aplicación y los beneficios del QFD en empresas de servicios en América Latina y el Caribe (ALC). Para ello, se utilizó un enfoque estructurado en tres fases: primero, se definió claramente el problema de investigación y se delimitó el alcance; segundo, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de fuentes académicas relevantes; y tercero, se realizó un análisis y síntesis de la literatura consultada. Este desarrollo asegura un estudio riguroso y transparente que ofrece un estado del arte actual sobre el tema, y que también establece una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el ámbito de los servicios en ALC.

El sector servicios enfrenta desafíos específicos en la gestión de calidad debido a la intangibilidad, inseparabilidad y variabilidad que caracterizan sus procesos. Aunque hay muchas investigaciones sobre la aplicación del QFD en el mundo, en ALC esta metodología no está tan difundida. Así, al delimitar la búsqueda, se establece la importancia de analizar el impacto del QFD en las empresas de servicios de ALC, como el alcance temático de este estudio.

### 1.1 Marco teórico

Juran expresó que calidad significa que un producto sea adecuado para su uso. Entonces, la calidad consiste en la ausencia de deficiencias en aquellas características que satisfacen al cliente. (Juran, 1990)

En concordancia y de acuerdo con la definición de la norma ISO 9000:2015, el término calidad es entendido internacionalmente como la capacidad para satisfacer a los clientes, y por el impacto previsto y el no previsto sobre las partes interesadas pertinentes. En el ámbito de servicios, la calidad implica la satisfacción plena de las expectativas del cliente, como así también el cumplimiento del propósito del servicio y la mejora continua de la organización. (ISO, 2015)

A tal efecto, los japoneses desarrollaron un enfoque llamado Despliegue de la Función de Calidad para satisfacer los requisitos del cliente en todo el proceso de diseño y también en el diseño de los sistemas de producción. El primer libro sobre el tema fue "Implementación de la Función de Calidad", de Akao y Mizuno, publicado por JUSE Press en 1978 y en 1983, el primer artículo sobre QFD de Akao apareció en Quality Progress de la American Society for Quality Control -ASQC, conocida actualmente como ASQ (American Society for Quality), y a partir de ahí, la difusión e implementación fue rápida. (Ficalora, 2010)

El cofundador del QFD, Yoji Akao, definió el QFD integral como la conversión de las demandas de los consumidores en características de calidad y el desarrollo de una calidad de diseño para el producto terminado mediante el despliegue sistemático de las relaciones entre las demandas y las características, comenzando con la calidad de cada componente funcional y extendiendo el despliegue a la calidad de cada pieza y proceso, en busca de la calidad integral. (ISO, 2021)

Según Evans y Lindsay, el QFD es un proceso de planeación para guiar el diseño, manufactura y comercialización de productos/servicios integrando la voz del cliente en toda la organización. A través del QFD, todas las decisiones de diseño, manufactura y control se toman de modo que satisfagan las necesidades expresas del cliente, utilizando un diagrama de matriz para presentar los datos y la información. (Evans, 2015)

La construcción de la casa de la calidad, nombrada así por la forma de la matriz de la Figura 1, consiste en seis pasos básicos: Identificar los requisitos del cliente, identificar los requisitos técnicos, relacionar los requisitos del cliente con los requisitos técnicos, realizar una evaluación de los productos o servicios competitivos, evaluar los requisitos técnicos y desarrollar los objetivos; determinar qué requisitos técnicos se deben desplegar en el resto del proceso de producción/entrega. (Evans, 2015)

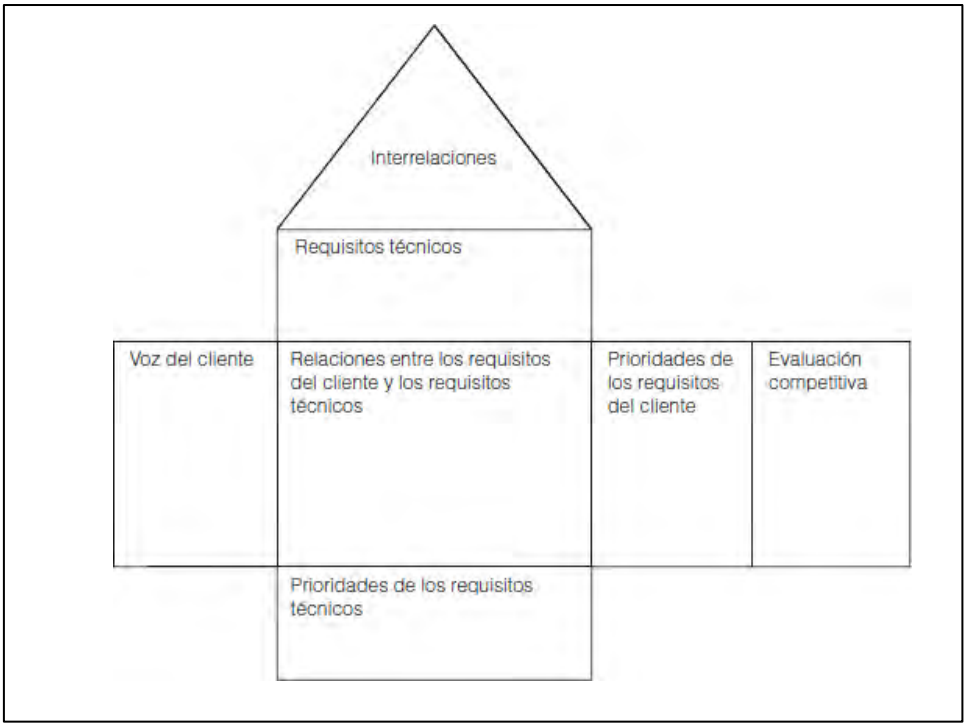



*Figura 1 La casa de calidad. Fuente: Evans y Lindsay, 2015*

En la medida en que se desarrolle el producto o servicio que posea los atributos que el cliente realmente valora, las empresas se tornan más competitivas, pues conquistan nuevos mercados y aumentan su participación en los segmentos en los que actualmente operan y en otros nuevos, generando valor sostenible a largo plazo.

Según Elorza, en las discusiones sobre el desarrollo económico de América Latina y el Caribe, frecuentemente se destacan las desigualdades en el acceso a infraestructura, innovación y educación, pero además existe una restricción estructural en términos de calidad. Esto se manifiesta en que numerosos productos y servicios no alcanzan los estándares técnicos, sanitarios, de procesos y de sostenibilidad requeridos por los mercados internacionales, lo que impacta directamente en el potencial de exportación, diversificación, industrialización y en la generación de empleo de calidad. (Elorza, 2025)

Además, el sector servicios enfrenta desafíos particulares en la gestión de calidad debido a la intangibilidad, inseparabilidad y variabilidad inherentes a sus procesos. El uso de QFD permite convertir las necesidades del cliente en especificaciones del servicio, priorizar las mejoras a implementar basadas en percepción de valor por parte de los usuarios, y facilitar respuestas innovadoras y personalizadas en ambientes altamente competitivos, como ocurre en las industrias turísticas, consultoría, salud y educación. (Evans, 2015)

El QFD suele usarse en conjunción con otras herramientas e instrumentos como SERVQUAL, ampliamente adoptado para medir la percepción de la calidad de servicio en Latinoamérica, y que ayuda a identificar y priorizar elementos de mejora para la experiencia del usuario. (Terán Ayay,2021)

## 2. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico del estudio es cualitativo y sistemático, se centra en el análisis de fuentes documentales seleccionadas mediante criterios de relevancia teórica y actualidad (2020-2025).

En primer lugar, se definió claramente el problema de investigación: La importancia de la aplicación de QFD en el sector servicios en AML, estableciendo la relevancia de analizar el tema.

En la segunda fase, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de información en bases de datos académicas, libros y artículos científicos, empleando criterios rigurosos de selección para asegurar la calidad y pertinencia de las fuentes consultadas.

Se realizó la búsqueda de información en artículos de Researchgate, Scielo, Google Academic, y ALICIA utilizando la palabra clave “QFD” a partir del año 2020, a fin de realizar una revisión actualizada, y filtrando los artículos por sector servicios. La selección de artículos se realizó en primer lugar por el título y luego por el resumen. Además, se seleccionaron los documentos de acceso abierto. Se recopilaron 14 artículos, entre publicaciones de revista y tesis.

Finalmente, se procedió a la organización y análisis crítico de la literatura recopilada, sintetizando los hallazgos más relevantes y estableciendo conexiones entre los distintos enfoques y resultados reportados en la bibliografía.

Esta metodología garantiza la trazabilidad, transparencia y rigor en la construcción del estado del arte sobre la aplicación y beneficios del QFD en el sector servicios en AML, aportando una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas

## 3. RESULTADOS

Se recopilaron y analizaron 14 artículos publicados desde 2020 en AML, en la Figura 2 se muestra el gráfico de la distribución de estos por cada año. Los años 2021 y 2023 presentan la mayor cantidad de publicaciones encontradas.

En la Figura 3, se representa el origen de cada publicación, siendo Perú y México los países con mayor cantidad de artículos. Es escasa la diferencia entre cantidad de publicaciones encontradas por repositorio (Figura 4).

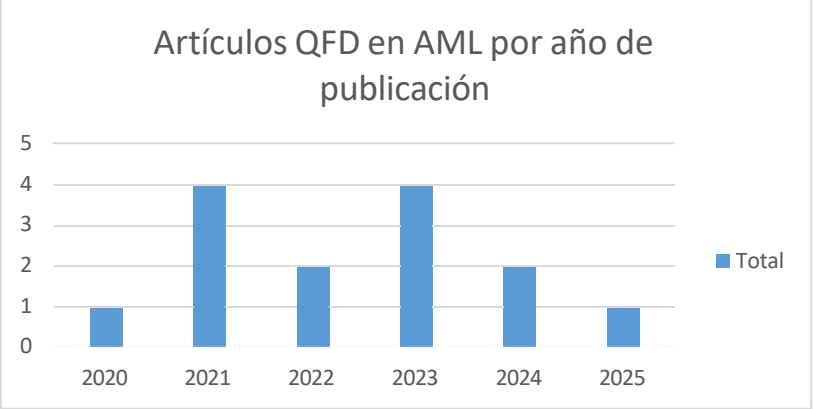



*Figura 2 Distribución de artículos analizados, según año de publicación*

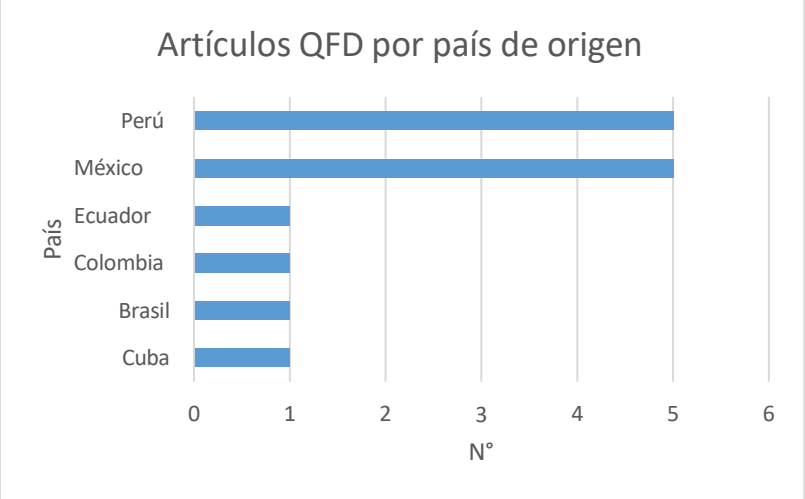



*Figura 3 Distribución de artículos analizados, según país de origen*

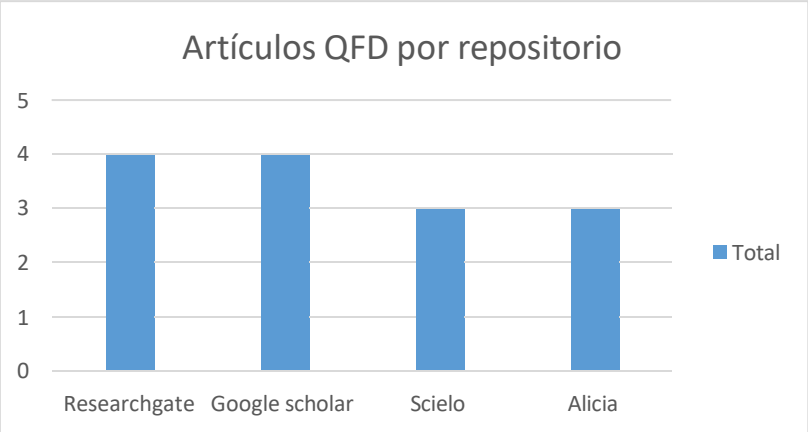



*Figura 4 Distribución de artículos analizados, según repositorio*

Se presenta en la Tabla 1 las principales contribuciones de los autores, expresadas en los resultados y conclusiones de cada artículo.

Las líneas generales de los distintos estudios que emplearon QFD para mejorar servicios y procesos en contextos variados, destacando su versatilidad y efecto positivo en la satisfacción de usuarios y cumplimiento de objetivos estratégicos, se exhibe en la Tabla 2.

*Tabla 1 Análisis de resultados y conclusiones. Fuente: elaboración propia*

| **Autor** | **Título del Trabajo** | **Sector** | **Principales Conclusiones** |
|---|---|---|---|
| Mantari Laureano, J. L. et al. (2025) | Plan Estratégico de Investigación Basado en Quality Function Deployment (QFD) para Maximizar la Captura del Valor y Beneficios | Investigación/ Plan Estratégico | QFD permitió diseñar un plan estratégico alineado con requisitos institucionales y nacionales, facilitando la captación de valor y atracción de financiamiento para investigación en Perú. |
| Figueroa Donayre, E.M. et al. (2023) | Plan estratégico disruptivo de innovación para una universidad usando "La casa de la calidad" | Educación Superior | Plan estratégico disruptivo para universidad que maximiza valor mediante QFD, alineado con necesidades nacionales, contribuyendo a generación de conocimiento, patentes y acreditación universitaria. |
| Valencia Cáceres y Gonza Tito (2023) | Implementación de un modelo de Gestión de Calidad, basado en el QFD para mejorar el nivel de servicio en la empresa Atria Energía S.A.C. | Empresa privada/ Servicios | Implementación de QFD mejoró satisfacción al cliente al 90%, aumentó utilidades, fidelización en 16% y crecimiento de clientes en 26% en empresa Atria Energía. |
| Santos Escudero, D. A. (2022) | Optimización del proceso de servicio de control y contención de derrames de hidrocarburos aplicando el despliegue de función de la calidad (QFD) | Control de derrames/ Servicios | Detección de afectaciones del cliente. Optimización del servicio con QFD: reducción de tiempos, capacitación, mejora de equipos y aumento de satisfacción del cliente en empresa OIL SPILL CONTROL SOLUTIONS. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Alvarado Tarango, L. et al. (2021) | Elaboración de estrategias de mejora continua del servicio de un IES con enfoque "Despliegue de la función calidad" QFD | Educación Superior | QFD útil para diseñar estrategias de mejora continua, alineando recursos con expectativas y necesidades de los alumnos en una institución educativa. Permite recopilar los deseos del usuario, para analizarlos, relacionarlos y proponer estrategias y acciones. |
| Callirgos-Montoya, L. A. (2021) | Enfoque QFD para diseño de servicios en el sector de hotelería en Lima-Perú | Hotelería | QFD aplicado para virtualización y rediseño de servicios hoteleros como respuesta al aislamiento social, promoviendo transformación digital y contacto cero. |
| González Cruz, E. et al. (2023) | Despliegue de la calidad y análisis de la criticidad en los servicios | Gestión de servicios | Combinación de QFD con análisis de criticidad para priorizar características de calidad críticas, facilitando planes de mejora en procesos de servicios. |
| Montesinos-González, S. (2022) | Mejora continua de un posgrado en México aplicando el QFD | Educación/ Posgrados | Implementación de QFD en planes de estudio para identificar y planear con anticipación las necesidades de los segmentos involucrados, priorizar necesidades académicas, mejorar toma de decisiones y potenciar la mejora continua en posgrados. |
| Cruz-Rivero, L. et al. (2023) | El despliegue de la función de la calidad y la teoría para la solución de problemas de inventiva: un análisis de aproximación para la satisfacción de los requerimientos del cliente | Innovación/ Producto | Integración de QFD con TRIZ para mejorar diseño y satisfacción de requerimientos en productos, mostrando sinergia entre metodologías. La aplicación conjunta de ambas puede generar mejores resultados que si son aplicadas de manera independiente. |
| Morquecho Morocho, V. E. (2024) | Uso del despliegue funcional de la calidad (QFD) para incluir la voz del cliente en la gestión por proceso de las organizaciones de salud | Salud/ Gestión por procesos | QFD relevante y efectiva para alinear procesos internos a necesidades del paciente, facilitando mejora continua y atención segura y centrada en el usuario. Los datos recopilados de manera efectiva de los pacientes y sus familias son esenciales para el éxito. |
| Montesinos-González, S. et al. (2021) | Desarrollo de la metodología FODA y QFD a un programa de estudios | Educación/ Planificación | Uso combinado de FODA y QFD para actualización de programas educativos, alineando con demandas industriales y mejorando competitividad académica. |
| Paredes Zúñiga, C. (2024) | Aplicación de la metodología despliegue de la calidad (QFD) para mejorar el nivel de satisfacción del cliente del restaurante Cevichito Pliz en la región de Arequipa | Restaurantes/ Servicios | Aplicación de QFD incrementó en 20.8% la satisfacción del cliente en restaurante; se priorizaron mejoras en capacitación, procesos, promociones y empaques con resultados económicos favorables. Se utilizó la metodología Kano para darle grado de importancia a las características de calidad en el servicio. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Paredes-Rodríguez, A. M. et al. (2021) | Metodología para la priorización de la entrega de ayudas humanitarias en el contexto de la pandemia covid-19, utilizando la herramienta QFD Fuzzy | Ayuda humanitaria/ Pandemia | Metodología QFD Fuzzy utilizada para priorizar entrega de ayudas humanitarias durante covid-19, mejorando equidad y efectividad pese a recursos limitados. |
| Galiotto, J. C. y Cassel, R. A. (2020) | Proposta para avaliação de fornecedores utilizando a integração dos métodos AHP/QFD | Evaluación de proveedores | Integración AHP y QFD para evaluación de proveedores con modelo adaptable, que permite ponderar criterios estratégicos y mejorar la toma de decisiones en cadenas de suministro. |

En la Tabla 2, se observa el análisis de contribuciones por sector de empresas de servicio, educativo, empresarial, salud, hotelería, industrial y social.

*Tabla 2 Contribuciones por sector. Fuente: elaboración propia*

| **Sector** | **Autores** | **Principales contribuciones** |
|---|---|---|
| Investigación y Educación | Mantari Laureano et al. (2025), Figueroa Donayre et al. (2023), Alvarado Tarango et al. (2021), Montesinos-González et al. (2021), Montesinos-González (2022) | QFD permitió diseñar planes estratégicos e innovadores alineados con necesidades institucionales y nacionales, facilitando la obtención de financiamiento, acreditación y la generación de conocimiento académico. Además, se aplicó para la mejora continua en planes de estudio y procesos educativos con enfoque en satisfacer expectativas y necesidades de estudiantes y sectores productivos. |
| Servicios y Empresas | Valencia Cáceres et al. (2023), Santos Escudero (2022), Paredes Zúñiga (2024) | Implementación de QFD mejoró niveles de servicio, satisfacción y fidelización en empresas privadas y restaurantes. Se destacaron mejoras en tiempos de atención, capacitación, procesos de cobro, promociones, empaques y en la gestión de pedidos delivery, con resultados económicos positivos. |
| Salud | Morquecho Morocho (2024) | QFD contribuyó a la alineación de procesos internos con la voz del paciente, mejorando la calidad, seguridad y efectividad de la atención médica. Facilitó la priorización de requisitos y la implementación de ciclos de mejora continua adaptados a las necesidades cambiantes de los usuarios. |
| Hotelería | Callirgos-Montoya (2021) | QFD aplicado para rediseño y virtualización de servicios hoteleros afectados por aislamiento social, impulsando la transformación digital, optimizando operaciones y favoreciendo el contacto cero en la experiencia del cliente. |
| Industria y Producción | Galiotto y Cassel (2020), Cruz-Rivero et al. (2023), González Cruz et al. (2023) | QFD se usó para evaluación de proveedores, optimización del diseño de productos y almacenamiento, y análisis de criticidad en procesos, permitiendo definir indicadores de desempeño, mejorar diseño y logística, priorizar |

| | | |
|---|---|---|
| | | características de calidad críticas y facilitar decisiones estratégicas con aplicación en diferentes ramas industriales. |
| Ayuda Humanitaria | Paredes- Rodríguez et al. (2021) | QFD fuzzy facilitó la priorización rigurosa y equitativa en la entrega de ayudas humanitarias durante la pandemia, permitiendo una asignación más efectiva pese a la limitación de recursos y considerando múltiples variables de vulnerabilidad en la población. |

Al analizar los resultados de los trabajos, se encuentran diversos aportes que evidencian la aplicación exitosa de la metodología QFD en diferentes sectores y además en ámbitos variados, como mejora continua, gestión de calidad, optimización, satisfacción del cliente y toma de decisiones. Se presenta una tabla categorizando los aportes por tema.

*Tabla 3 Contribuciones por tema. Fuente: elaboración propia*

| **Tema** | **Autor** | **Resultados obtenidos principales** |
|---|---|---|
| Mejora continua | Montesinos González (2022) | Aplicación de QFD en planeación y mejora de posgrado, identificando necesidades y priorizando recursos para mejorar propuesta académica y procesos. |
| | Paredes Zúñiga (2024) | Incremento del 20.8% en satisfacción del cliente tras implementar mejoras basadas en QFD, con mejoras en capacitación, procesos de cobro y presentación. |
| | Montesinos González et al. (2021) | Uso de FODA y QFD para actualizar programa de posgrado, mejora continua en base a requerimientos y necesidades académicas y sociales. |
| Satisfacción al cliente | Figueroa Donayre et al. (2023) | Plan estratégico alineado con necesidades y satisfacción de clientes internos y externos, con enfoque en generación de beneficios económicos. |
| | Valencia Cáceres et al. (2023) | Modelo de gestión de calidad basado en QFD mejoró nivel de servicio y satisfacción al cliente, incrementando fidelización y utilidades en la empresa. |
| | Paredes Zúñiga (2024) | Mejora en satisfacción del cliente, con implementación de capacitación, estandarización y promociones, aumentando valoración. |
| Gestión de la calidad | González Cruz et al. (2023) | Despliegue de calidad y análisis de criticidad en servicios académicos, identificando características críticas y proponiendo mejoras en gestión universitaria. |
| | Cruz-Rivero et al. (2023) | Integración de metodologías QFD y TRIZ para mejorar solución de problemas, promoviendo innovación y diseño basado en necesidades y requerimientos técnicos. |
| | Morquecho Morocho (2024) | QFD relevante para alinear necesidades de pacientes con procesos, mejorando calidad y seguridad en la atención médica. |
| Optimización | Santos Escudero (2022) | Optimización del proceso de servicio para reducir tiempos de respuesta, mejorando calidad y satisfacción del cliente mediante QFD. |
| Toma de decisiones | Paredes-Rodríguez et al. (2021) | Metodología que integra QFD y valoración difusa para priorizar asignación equitativa y efectiva de ayudas en pandemia, mejorando la toma de decisiones. |

| | | |
|---|---|---|
| | Galiotto y Cassel (2020) | Propuesta integrando AHP y QFD para evaluación de proveedores, adaptable a diferentes industrias, facilitando la toma de decisiones estratégica. |

## 4. CONCLUSIONES

La implementación de QFD en empresas de servicios ha sido un gran paso para mejorar los niveles de prestación: La satisfacción de los clientes, mediante la optimización de procesos, la capacitación de los empleados, tiempos de atención a clientes, cobros y promociones de servicios y gestión de pedidos. Con estas mejoras en los procesos y en base a las expectativas del cliente, las empresas de servicios han recibido resultados positivos, tanto económicos como en aumento y fidelización de clientes.

La ayuda que aporta QFD a que los procesos internos de la empresa se ajusten a las necesidades y expectativas del cliente, se presenta como algo fundamental para la mejora continua en el sector de servicios. Esta metodología se enfoca en mejorar procesos específicos, como así también, para desarrollar planes estratégicos que integran las necesidades del cliente con los objetivos de la organización. Esto resulta esencial para mantener la competitividad y sostenibilidad en el mercado de AML.

El Despliegue de la Función Calidad es una herramienta clave para la mejora continua, la innovación y la competitividad en las empresas de servicios en América Latina y el Caribe, sin embargo, no es una metodología tan difundida actualmente, dada la cantidad de artículos y publicaciones encontradas. Si bien permite adaptarse de manera efectiva a las cambiantes demandas de los clientes y del entorno económico y social, no se ve reflejado en las publicaciones que se estén aprovechando tales beneficios.

## 5. REFERENCIAS.


Alvarado Tarango, L., Pinto-Santos, J. A., y Tarango Hernández, L. E., Terrazas Mata, L. E. y Zorrilla Briones, F. (2021). Elaboración de estrategias de mejora continua del servicio de un IES con enfoque "Despliegue de la función calidad" QFD. *Theorema, revista científica.* https://www.researchgate.net/publication/358149550_ELABORACION_DE_ESTRATEGIAS_DE_MEJORAA_CONTINUA_DEL_SERVICIO_DE_UN_IES_CON_ENFOQUE_DESPLIEGUE_DE_LA_FUNCION_CALIDAD_QFD

Callirgos-Montoya, L. A. (2021). Enfoque QFD para diseño de servicios en el sector de hotelería en Lima-Perú. [Tesis, Universidad de Lima]. https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/13300

Cruz-Rivero, L., Meráz-Rivera, J., y Lince-Olguín, E. (2023). El despliegue de la función de la calidad y la teoría para la solución de problemas de inventiva: un análisis de aproximación para la satisfacción de los requerimientos del cliente. *Ingeniería Industrial*, (45), 91-108. https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/view/6595

González Cruz, E., Hernández Pérez, G.D., Comas Rodríguez, R., & Fernández Clúa, M.J. (2023) Despliegue de la calidad y análisis de la criticidad en los servicios. Caso Procesos Académicos. *Universidad y Sociedad* 15(S3),55-65. https://www.researchgate.net/publication/377299599_DEPLOYMENT_OF_QUALITY_AND_ANALYSIS_OF_CRITICALITY_IN_SERVICES_CASE_ACADEMIC_PROCESSES#fullTextFileContent

Elorza, J. C. y Vidal, R. (01 de agosto de 2025). La barrera de la calidad: un obstáculo silencioso para el desarrollo productivo en América Latina y el Caribe. *CAF- Banco de desarrollo de América Latina y El Caribe*. https://www.caf.com/es/blog/la-barrera-de-la-calidad-un-obstaculo-silencioso-para-el-desarrollo-productivo-en-america-latina-y-el-caribe/

Evans, J. R. y Lindsay, W. M. (2015). *Administración y control de la calidad*, 9a. ed. Cengage Learning

Ficalora, J. P. y Cohen, L. (2010). *Quality function deployment and Six Sigma: a QFD handbook*. 2nd ed. Pearson Education, Inc.

Figueroa Donayre, EM, Mantari Laureano, JL, Loayza Cuadra, E., Zubilete Rivera, J., Medina Raya, F., y Morales Grados, ME (2023). Plan estratégico disruptivo de innovación para una universidad usando “La casa de la calidad.” *Revista IECOS*, 24(2), 160–179.

https://doi.org/10.21754/iecos.v24i2.1954
https://www.researchgate.net/publication/382123895_Plan_estrategico_disruptivo_de_innovacion_para_una_universidad_usando_La_casa_de_la_calidad

Juran, J. M. (1990). *Juran y el liderazgo para la calidad*. Ediciones Díaz de los Santos.

ISO 16355-1:2021. Application of statistical and related methods to new technology and product development process. Part 1: General principles and perspectives of quality function deployment (QFD). 31 de mayo de 2021. ISO -The International Organization for Standardization

ISO 9000:2015. Sistemas de gestión de la calidad. Fundamentos y vocabulario. ISO -The International Organization for Standardization

Mantari Laureano, J. L., Figueroa Donayre, E, Say, J., Molina, T., Carrion, C., Olivera, A., y Cuba, L. (2025). Plan Estratégico de Investigación Basado en Quality Function Deployment (QFD) para Maximizar la Captura del Valor y Beneficios. *IECOS, Investigaciones Económicas y Sociales*. *IECOS*. 26. 115-134. https://www.researchgate.net/publication/390409405_Plan_Estrategico_de_Investigacion_Basado_en_Quality_Function_Deployment_QFD_para_Maximizar_la_Captura_del_Valor_y_Beneficios

Montesinos-González, S. (2022). Mejora continua de un posgrado en México aplicando el QFD. *DYNA*, *89* (spe222), 106-114. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532022000300106&lang=es

Montesinos González, S., Flores Castillo, L. A., & Aguilar Cruz, C. (2021). Desarrollo de la metodología FODA y QFD a un programa de estudios. *Innovación Productiva*. https://www.utm.mx/avance_mir_2021/Programa 104/001 DESAROLLO_PROYECTOS_INVESTIGACION/Productos de investigacion/1 Inst_IIA/Otros/Capitulo libro Innovacion Productiva_Cap 10_pp 142-167.pdf#page=146

Morquecho Morocho, V. E. (2024). Uso del despliegue funcional de la calidad (QFD) para incluir la voz del cliente en la gestión por proceso de las organizaciones de salud. [Tesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. https://repositorio.puce.edu.ec/items/ca99813f-6314-4882-b10f-a93689db07e9

Paredes-Rodríguez, A. M., Rojas-Reyes, J. J. P.-O., & León, D. (2021). Metodología para la priorización de la entrega de ayudas humanitarias en el contexto de la pandemia covid-19, utilizando la herramienta QFD Fuzzy. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, *13*(2), 72-84. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2422-42002021000200072&lang=es

Paredes Zúñiga, C. (2024). Aplicación de la metodología despliegue de la calidad (QFD) para mejorar el nivel de satisfacción del cliente del restaurante Cevichito Pliz en la región de Arequipa. [Tesis, Universidad Católica de Santa María]. https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/cbc56bfe-f326-4eb7-a233-749c50fef816

Santos Escudero, D. A. (2022). Optimización del proceso de servicio de control y contención de derrames de hidrocarburos aplicando el despliegue de función de la calidad (QFD) en la empresa OIL SPILL CONTROL SOLUTIONS S.A DE C.V. [Tesis, Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache]. https://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/5501

Terán Ayay , N. T., Gonzáles Vásquez, J., Ramirez-López, R., & Palomino Alvarado, G. del P. (2021). Calidad de servicio en las organizaciones de Latinoamérica. *Ciencia Latina, Revista Científica Multidisciplinar*, 5(1), 1184-1197. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i1.320

Valencia Cáceres, J. A. y Gonza Tito, C. O. (2023). Implementación de un modelo de Gestión de Calidad, basado en el QFD para mejorar el nivel de servicio en la empresa Atria Energía S.A.C. – 2023. [Tesis, Universidad Tecnológica del Perú.] https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/8517

# OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE ATENCIÓN PRIMARIA DE LA SALUD

Moreno, Graciela A.[1,2]; Moreno, M. Susana[1]; Blanco, Aníbal M.[1]

*(1) Planta Piloto de Ingeniería Química – PLAPIQUI (CONICET-Universidad Nacional del Sur), Bahía Blanca, Argentina.*
*(2) Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Córdoba, Argentina.*
gmorenoing@gmail.com; smoreno@plapiqui.edu.ar; ablanco@plapiqui.edu.ar

**RESUMEN**

Este estudio propone un algoritmo evolutivo biobjetivo para asistir en el rediseño de redes de salud pública del primer nivel de atención. El propósito es identificar la ubicación más adecuada para los centros de salud, que maximicen la demanda de consultas anuales en los servicios preventivos y minimicen los costos del sistema. Para ello, se emplea una estimación simplificada de los costos y un modelo sencillo de la predisposición de la población a trasladarse. La frontera de Pareto se obtiene mediante el algoritmo NSGA-II, a partir de la cual se selecciona la solución de compromiso en base a dos indicadores de desempeño adicionales: la equidad en la cobertura de la necesidad y la equidad en la carga laboral entre los centros. La desagregación territorial se realiza a nivel de radios censales, utilizando datos del Censo 2022. La metodología propuesta se valida mediante su aplicación en el distrito de Bahía Blanca (Buenos Aires, Argentina).

**Palabras Claves:** optimización multiobjetivo NSGA-II, equidad, costo, demanda.

**ABSTRACT**

This study proposes a bi-objective evolutionary algorithm to assist in redesign of public health networks at the primary care level. The goal is to identify the most suitable location for health centers maximizing demand for annual preventive care consultations and minimizing system costs. A simplified cost estimation and a basic model of the population's willingness to travel are used for this purpose. The Pareto frontier is obtained using the NSGA-II algorithm, from which the compromise solution is selected based on two additional performance indicators: equity in coverage of healthcare need and equity in workload distribution among centers. Territorial disaggregation is performed at the census tract level, using data from the 2022 Census. The proposed methodology is validated by applying it in Bahía Blanca district (Buenos Aires, Argentina).

**Keywords:** NSGA-II multi-objective optimization, equity, cost, demand.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los países, los sistemas de salud pública se estructuran comúnmente en tres niveles de atención (Mousazadeh et al., 2018). El Primer Nivel de Atención (PNA) está constituido por centros enfocados en la prevención de enfermedades y en la atención de patologías menores. El segundo nivel se refiere principalmente a los hospitales generales que reciben, idealmente, pacientes derivados del primer nivel. El tercer nivel se encarga de los tratamientos especializados y de alta complejidad.

El acceso adecuado de la población al PNA es una de las principales preocupaciones de los países, ya que los servicios de salud preventivos constituyen uno de los pilares fundamentales de las sociedades modernas (Obeidat & Alourd, 2024). La infraestructura del PNA se organiza en Centros de Atención Primaria de la Salud (CAPS), que suelen estar distribuidos de manera amplia en las áreas urbanas.

El estudio del acceso a los servicios de salud requiere comprender tanto la necesidad como la demanda, con el fin de ajustar la oferta a los cambios demográficos y socioeconómicos de las comunidades (Elorza et al., 2022).

La oferta está vinculada a la infraestructura existente, es decir, al número de CAPS disponibles en el sistema y su localización geográfica, así como a la cantidad y tipo de servicios de salud que se proporcionan en cada uno de ellos. La necesidad se refiere a la localización, cantidad y tipo de personas (niños, adolescentes, adultos, ancianos, hombres, mujeres) que se espera demanden los servicios ofrecidos en los CAPS. Por último, la demanda corresponde al número de personas que realmente asisten a utilizar los servicios en los CAPS.

El incremento en el número de centros dentro de la red, así como en los servicios ofrecidos en cada uno de ellos, con el propósito de maximizar la demanda, conlleva un aumento en los costos de inversión y mantenimiento. Por lo tanto, el diseño de una red se configura naturalmente como un problema de múltiples objetivos.

Adicionalmente, la equidad en relación con la cobertura de la necesidad es uno de los principios más relevantes que deben tenerse en cuenta en la planificación del sistema de salud. Aunque no existe una única definición aceptada, algunos autores describen la equidad en términos de la satisfacción sin envidia. El criterio de envidia, que se define como la discrepancia en la satisfacción entre los usuarios (Chanta et al., 2014) se utiliza en la literatura con el propósito de representar dicha diferencia. En los problemas de localización de instalaciones, se aplica para modelar la equidad en la provisión de servicios (Blanco et al., 2024).

Otro elemento a tener en cuenta es la equidad en la carga laboral en los diferentes centros, dado que la existencia de una afluencia balanceada a los CAPS suele ser preferible al momento de diseñar un sistema que se adapte a la infraestructura existente en las ciudades (Bozorgi-Amiri & Hosseinzadeh, 2018).

El número y la ubicación de los centros a establecer determinan la cobertura (a maximizar) y los costos del sistema (a minimizar). En este estudio la demanda, se vincula con la necesidad a través de un modelo simple de predisposición al traslado (Moreno et al., 2024a). El costo del sistema abarca, de manera simplificada, los aspectos operativos y de instalación. La demanda y el costo se optimizan de manera simultánea utilizando un algoritmo genético elitista multiobjetivo (NSGA-II), que genera un conjunto de soluciones no dominadas en un frente de Pareto. Para elegir entre todas las soluciones, se propone la utilización de criterios adicionales de equidad en relación con la cobertura de la necesidad y la carga laboral en los centros de salud.

Para representar tanto la necesidad de servicios de salud de la población como la oferta de servicios disponible en cada CAPS y la demanda estimada hacia estos últimos, se emplea un Sistema de Información Geográfico (SIG). Como caso de estudio, la metodología propuesta se aplica al partido de Bahía Blanca, una jurisdicción estudiada desde hace tiempo por nuestro grupo de investigación. El análisis se realiza a una escala desagregada en radios censales, empleando la información disponible más reciente disponible, proveniente del Censo 2022 (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos - INDEC, 2023).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Estimación de la necesidad y la demanda

Para llevar a cabo el análisis de la población del partido de Bahía Blanca, se utilizó como base la información proporcionada por el Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022 del Instituto

Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC, 2023), el cual divide el partido en 488 radios censales. Se reporta una población total de 336.557 habitantes, de la cual un 27,2% no cuenta con cobertura médica (Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, s.f.). Los datos geoespaciales provienen de una capa vectorial en formato GeoJSON de los radios censales, obtenida del trabajo de De Grande & Salvia (2025).

Los servicios básicos del PNA considerados en este estudio, típicamente brindados en el partido de Bahía Blanca, son enfermería, medicina general/clínica médica, pediatría, ginecología, obstetricia, psicología y odontología.

El partido dispone de un total de 53 CAPS, de los cuales 11 son Centros de Salud (CS) y 42 son Unidades Sanitarias (US), siendo la diferencia entre ellos la cantidad de servicios ofrecidos y los horarios de atención (Portal de Gobierno Abierto del Municipio de Bahía Blanca, s.f.).

La oferta se estima como la disponibilidad de los servicios y su capacidad, basado en las horas anuales trabajadas por cada profesional y el número de consultas que se pueden atender por hora, según la especialidad.

La estimación anual de la necesidad de consultas médicas por especialidad para la población objetivo se realizó mediante la metodología de cálculo propuesta por Elorza et al. (2018). Tras definir la distribución poblacional en cada radio censal, diferenciada por grupo etario y sexo, se identificaron las diferentes necesidades de bienes y servicios de salud. En la Tabla 1 se muestran las proporciones de cada grupo poblacional, así como los porcentajes de personas sin seguro médico dentro de cada uno que se han considerado en este análisis.

La demanda se define como el número total de consultas atendidas por servicio en cada CAPS. Calcularla es un proceso complejo, ya que depende de múltiples factores. En este trabajo, el análisis se enfoca exclusivamente en la dimensión geográfica, bajo el supuesto de que la proximidad de una población determinada a un CAPS influye en su nivel de demanda, incrementando su utilización en comparación con aquellos localizados a mayor distancia.

La tendencia de una cierta población a demandar servicios en los CAPS, se modela entonces como una función lineal decreciente entre 1 y 0, en función de la distancia desde los nodos de necesidad (radios censales) hasta los nodos oferta (CAPS). Específicamente, la demanda de consultas disminuye entre 100% y 0% a medida que aumenta la distancia: entre 0-500 m (100%), más de 1500 m (0%) y una relación lineal entre esos dos valores. Este enfoque simplificado permite estimar la cantidad de consultas que se esperan en cada CAPS en función de su proximidad a la población (Moreno et al., 2024a).

*Tabla 1 Distribución poblacional*

| Edad | Sexo | Proporción | % sin seguro |
|---|---|---|---|
| <1;1;2 | Ambos | 0,01 | 35 |
| 3-4 | Ambos | 0,02 | 35 |
| 5-9 | Ambos | 0,07 | 33 |
| 10-14 | M | 0,04 | 32 |
| | H | 0,04 | 31 |
| 15-19 | M | 0,04 | 31 |
| | H | 0,04 | 31 |
| 20-39 | M | 0,15 | 35 |
| | H | 0,14 | 34 |
| 40-64 | M | 0,15 | 22 |
| | H | 0,14 | 26 |
| >=65 | M | 0,08 | 3 |
| | H | 0,06 | 5 |

### 2.2. Estimación del costo

Los costos del sistema están relacionados con la cantidad de centros disponibles y la oferta de servicios sanitarios que se proporcionan en ellos. En este análisis, se considera que los 11 CS forman parte de la oferta permanente del PNA, lo que significa que permanecerán en sus ubicaciones actuales. No obstante, se reconoce que los servicios ofrecidos en ellos (en tipo y volumen) pueden ser ajustados para adaptarse a la demanda existente. Por otra parte, se acepta que las US tienen la posibilidad de reubicarse en cualquier cantidad, lo que significa que pueden cambiar de ubicación y reducir o mantener su número, así como modificar el tipo y volumen de servicios que ofrecen. Además, se asume que cada CAPS es capaz de satisfacer la demanda total de los servicios que proporciona.

Para estimar el costo total del sistema, se tienen en cuenta cuatro categorías de costos: (*i*) el costo del personal sanitario, (*ii*) el costo operativo de las instalaciones (que incluye alquiler, electricidad y otros servicios necesarios para su funcionamiento), (*iii*) el costo variable de algunos servicios que se relaciona con los elementos utilizados en las consultas específicas de cada paciente y (*iv*) el costo de inversión de los nuevos CAPS.

El costo anual del personal sanitario de cada servicio $s$ en el centro $o$ ($CP_{o,s}$) se determina en la Ecuación (1) multiplicando el costo por hora del recurso humano del servicio ($ch_s$) por el número total de horas anuales trabajadas. Este último valor se estima a partir de la demanda anual de consultas del servicio ($D_{o,s}$) dividida por la cantidad de consultas realizadas en una hora ($cch$) ajustada, a su vez, por el modulador $\alpha_s$ , que refina la estimación del tiempo laboral del profesional.

$$CP_{o,s} = ch_s \cdot \frac{D_{o,s}}{\alpha_s \cdot cch} \qquad \forall o, s \tag{1}$$

El costo operativo ($CO_{o,s}$) se calcula de manera simplificada como una fracción del costo del personal. Por su parte, el costo variable ($CV_{o,s}$) corresponde al gasto de materiales necesarios para la atención de cada paciente (ejemplo: guantes, vacunas, etc.) y depende de la demanda de servicio ($D_{o,s}$) y el precio del material utilizado. Finalmente, el costo de inversión ($CI_o$) necesario para la instalación de nuevos CAPS asume que estos se pueden ubicar en inmuebles existentes, con gastos de remodelación moderados. De manera simplificada, este costo también se estima a partir del costo del personal, aplicando un factor que depende del servicio. Para los cálculos referidos, se utilizaron como base los costos en dólares expuestos en Elorza et al. (2022).

### 2.3. Algoritmo genético

En Moreno et al. (2024a), se introdujo un Algoritmo Genético (AG) diseñado para maximizar la demanda de consultas mediante la apertura de nuevos CAPS y la redistribución de las capacidades en los ya existentes.

Este algoritmo utiliza una codificación representada en una matriz (Figura 1), donde las filas corresponden a los radios censales (rc: 1 a *n*) y las columnas a los servicios que se pueden llegar a ofrecer en cada CAPS (s1 a s7).

Las filas resaltadas con subrayado indican los radios censales donde ya existe o se abrirá un CAPS. En estas filas, los servicios se asignan aleatoriamente, con un valor de 1 si se prestan y 0 si no. Es importante destacar que la existencia o instalación de un CAPS requiere, al menos, la prestación del servicio de enfermería (s1), el cual es obligatorio.

Una población de individuos, modelados mediante la codificación descripta, es sometida a los operadores de selección, cruce y mutación durante un número predeterminado de generaciones. La aptitud o *fitness* de cada individuo se evalúa en función de dos funciones objetivo: 1) maximizar la demanda anual de consultas y 2) minimizar el costo total del sistema. Los operadores genéticos de cruce y mutación permiten explorar el espacio de soluciones, mantener la viabilidad cromosómica y localizar las mejores alternativas, tal como se presentó en Moreno et al. (2024b).

La probabilidad de mutación aleatoria utilizada es del 0,3 y se empleó el cruce en un punto para generar y explorar las mejores soluciones. El operador de selección utilizado fue el torneo binario, el cual se detalla en la sección 2.4.

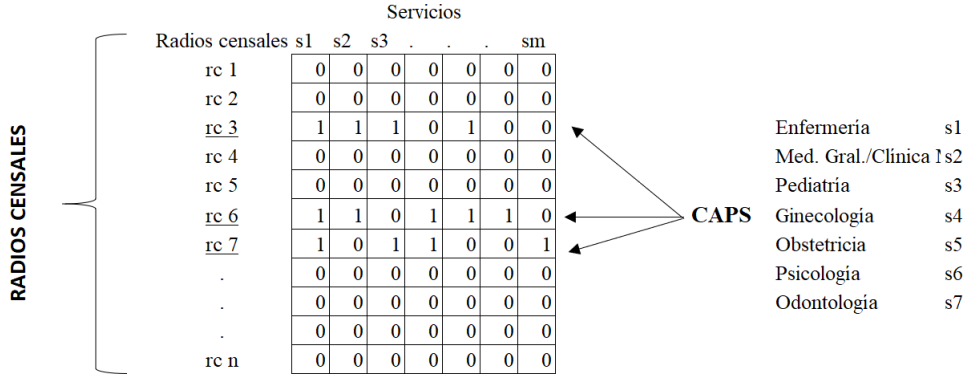



*Figura 1 Estructura del cromosoma propuesto.*

### 2.4. NSGA-II

El algoritmo NSGA-II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*) es un enfoque metaheurístico ampliamente utilizado para resolver problemas de optimización multiobjetivo (MOP). Propuesto por Deb et al. (2002), este algoritmo se basa en una población de soluciones y se destaca por su capacidad para encontrar la frontera de Pareto en una única ejecución.

Una de las principales características del NSGA-II es su habilidad para garantizar la diversidad de las soluciones durante el proceso de búsqueda, que se logra a través del cálculo de la distancia de apilamiento y la aplicación del elitismo, garantizando la selección de las mejores soluciones encontradas.

El proceso del NSGA-II comienza con la generación aleatoria de una población inicial de padres *P*, de tamaño *N,* la cual es clasificada en frentes de Pareto basados en los niveles de no dominancia, tal como indican Zheng et al. (2022). Las soluciones no dominadas son aquellas en las que no es posible mejorar un objetivo sin empeorar al menos uno de los objetivos restantes. Estos frentes se organizan de la siguiente forma: el primer frente ($F_1$) está compuesto por las soluciones que no son dominadas por ninguna otra, el segundo frente ($F_2$) por aquellas soluciones no dominadas excluyendo las del primer frente, y así sucesivamente, hasta completar todos los frentes ($F_n$) de la población (Figura 2).

El algoritmo, una vez generada la población *P*, procede a corregir las soluciones consideradas inviables en el cromosoma en relación a la habilitación de los servicios, por ejemplo, en CAPS que no disponen del servicio de enfermería. Luego, se calculan los dos objetivos de cada cromosoma y asigna un frente según su nivel de no dominancia. Posteriormente, se genera una población descendiente *H* de tamaño *N* mediante selección, cruzamiento y mutación (como se detalla en Moreno et al., 2024b). Después, se evalúan las soluciones descendientes y se forma una nueva población *R* de tamaño *2N* al combinar las poblaciones *P* y *H,* siguiendo el principio de elitismo.

La técnica de torneo binario se emplea para la selección, aplicando un operador de comparación de multitudes al evaluar las soluciones considerando dos criterios:

1. Rango de no dominancia: Si las soluciones pertenecen a frentes diferentes, se elige la de menor rango, lo que asegura que la solución seleccionada provenga del frente con mayor calidad en términos de dominancia.
2. Distancia de apilamiento: Si ambas soluciones pertenecen al mismo frente, se selecciona la que se encuentra en la región con mayor distancia de apilamiento, favoreciendo soluciones menos densas y promoviendo la diversidad en la población.

La distancia de apilamiento se calcula considerando las distancias promedio entre las dos soluciones vecinas a cada lado de la solución $i$ ( $i+1$ , $i-1$) dentro de un frente no dominado (ver $F_n$ en la Figura 2). Dicha métrica, estima el perímetro del rectángulo formado por los vecinos más cercanos a $i$, ayudando a controlar la distribución de las soluciones dentro del espacio de búsqueda.

El algoritmo realiza la asignación de frentes de menor a mayor, asegurando que el número de soluciones por frente no exceda el tamaño *N*. Si el último frente contiene más soluciones que el espacio disponible, se utiliza la estrategia de asignación basada en la distancia local de apilamiento para completar la población.

El proceso se repite hasta que se alcanza una condición de finalización definida previamente, permitiendo al NSGA-II encontrar una aproximación efectiva al frente de Pareto en un problema multiobjetivo.

Finalmente, en este trabajo se utiliza la métrica hipervolumen ($Hv$) para analizar la evolución de las soluciones no dominadas del algoritmo a lo largo de las iteraciones. Un valor de $Hv$ más alto indica una mejor convergencia y cobertura del frente de Pareto óptimo. El hipervolumen mide la diversidad y convergencia de las soluciones no dominadas mediante el espacio generado por cada conjunto de Pareto en relación a un punto de referencia y se estima como la unión de los volúmenes formados entre cada solución y dicho punto de referencia. La implementación del cálculo de $Hv$ fue realizada conforme al método propuesto por De Melo (2020).

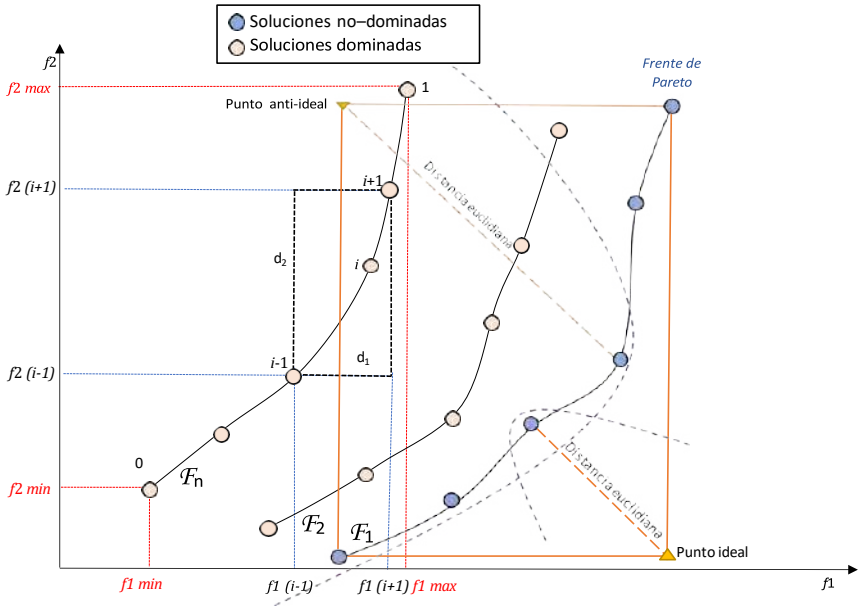



*Figura 2 Frente de Pareto del NSGA-II y distancia de apilamiento.*

Para concluir, cabe aclarar que, dado que el proceso de búsqueda aleatoria podría ubicar dos centros en radios censales muy próximos, se implementó un método para garantizar una distancia mínima entre ellos. En este estudio, se estableció un límite de 1000 m. Para cada individuo de la población, se calcula la distancia entre los radios censales de oferta establecidos y se registran en una matriz de control, asignando el valor 1 si la distancia es inferior a 1000 m y 0 en caso contrario. El procedimiento para eliminar los CAPS en regiones adyacentes consiste en recorrer cada fila del triángulo inferior de la matriz de control. Si se encuentra un valor igual a 1, se anulan en el cromosoma las ubicaciones correspondientes de dichos radios censales (columnas de la matriz).

### 2.5. Inequidad

En este trabajo se modela la inequidad en la cobertura de la necesidad como la envidia entre los nodos. Se dice que un nodo siente envidia cuando recibe un servicio inferior al de otros, y que no siente envidia si recibe un servicio igual o superior. Para cuantificar esta inequidad empleamos las definiciones propuestas en Pourrezaie-Khaligh et al. (2022). Como primer paso, se calcula la accesibilidad de cada nodo $rc$ en la Ecuación (2), que se define como la proporción de la necesidad de servicios atendida en las instalaciones habilitadas (nodos oferta $o$). El valor de accesibilidad obtenido está comprendido entre 0 y 1.

La necesidad atendida $D_{rc}$ es equivalente a la demanda en el nodo $rc$ lo que corresponde a la suma de consultas del radio censal $rc$ atendida en los CAPS $o$ nodos de oferta más próximos (Ecuación 3). La necesidad de consultas de servicios total del radio censal $rc$ $N_{rc}$, se calcula en la Ecuación (4) sumando los valores de necesidad correspondientes a cada grupo poblacional de cada servicio.

$$AN_{rc} = \frac{D_{rc}}{N_{rc}} \quad \forall\, rc \tag{2}$$

$$D_{rc} = \sum_{o} D_{rc,o} \quad (3)$$

$$N_{rc} = \sum_{g} \sum_{s} NE_{g,rc,s} \quad (4)$$

La envidia entre pares de nodos $E_{i,j}$ se define en la Ecuación (5), estableciendo que si la accesibilidad del nodo $i$, $AN_i$, es menor que la del nodo $j$, $AN_j$, entonces $E_{i,j}$ toma un valor igual a la diferencia entre ellas; en caso contrario, su valor es cero. El objetivo es localizar la oferta de manera de minimizar la inequidad del sistema, $IN$, definida en la Ecuación (6), como la suma de todos los elementos de la matriz de envidia, $E_{i,j}$.

$$E_{i,j} = \max\{0, AN_j - AN_i\} \quad (5)$$

$$IN = \sum_{i,j} E_{i,j} \quad (6)$$

Siguiendo la misma idea de inequidad en la cobertura de necesidad, también se plantea minimizar la inequidad en la carga laboral entre los CAPS. Si bien la equidad laboral entre los centros no constituye una restricción fuerte, ya que los centros con mayor infraestructura (tales como edificios y personal) pueden atender una mayor demanda que los centros más pequeños, una distribución equitativa de la carga laboral puede facilitar la implementación de soluciones en la práctica.

La carga laboral del nodo $o$ se calcula en la Ecuación (7), donde la demanda $D_o$, definida en la Ecuación (8), corresponde al total de consultas atendidas en dicho centro y $DT$ en la Ecuación (9) representa la demanda total de consultas en todos los CAPS del sistema.

$$AD_o = \frac{D_o}{DT} \quad (7)$$

$$D_o = \sum_{rc} \sum_{s} D_{rc,s,o} \quad (8)$$

$$DT = \sum_{rc} \sum_{s} \sum_{o} D_{rc,s,o} \quad (9)$$

La envidia entre pares de CAPS y la correspondiente inequidad en carga laboral se calcula en las Ecuaciones (10) y (11), respectivamente.

$$EL_{i,j} = \max\{0, \quad AD_j - AD_i\} \quad (10)$$

$$IL = \sum_{i,j} EL_{i,j} \quad (11)$$

## 3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación del algoritmo NSGA-II en el caso de estudio previamente descripto. Se permitió al algoritmo determinar la ubicación de entre 15 y 70 CAPS, manteniéndose fijas las ubicaciones de los 11 CS existentes. La ejecución se realizó con una población de 100 individuos y un criterio de parada basado en un número máximo de 250 generaciones. La implementación fue desarrollada en Python 3.12.

Se realizaron 10 ejecuciones independientes, utilizando la métrica de hipervolumen para evaluar el rendimiento del algoritmo evolutivo multiobjetivo (Figura 3). En el cálculo de hipervolumen ($Hv$), se utilizó como punto de referencia el valor anti-ideal de los dos objetivos considerados (demanda mínima: 16.326 y costo máximo: USD 10.714.588). El tiempo promedio de las ejecuciones fue de 370 segundos.

Un valor alto de esta métrica es deseable, ya que representa una alta diversificación de las soluciones óptimas de Pareto. Tal como se observa en la Figura 4, el mayor valor de $Hv$ obtenido corresponde a la ejecución *p6*, cuyo Pareto será analizado a continuación.

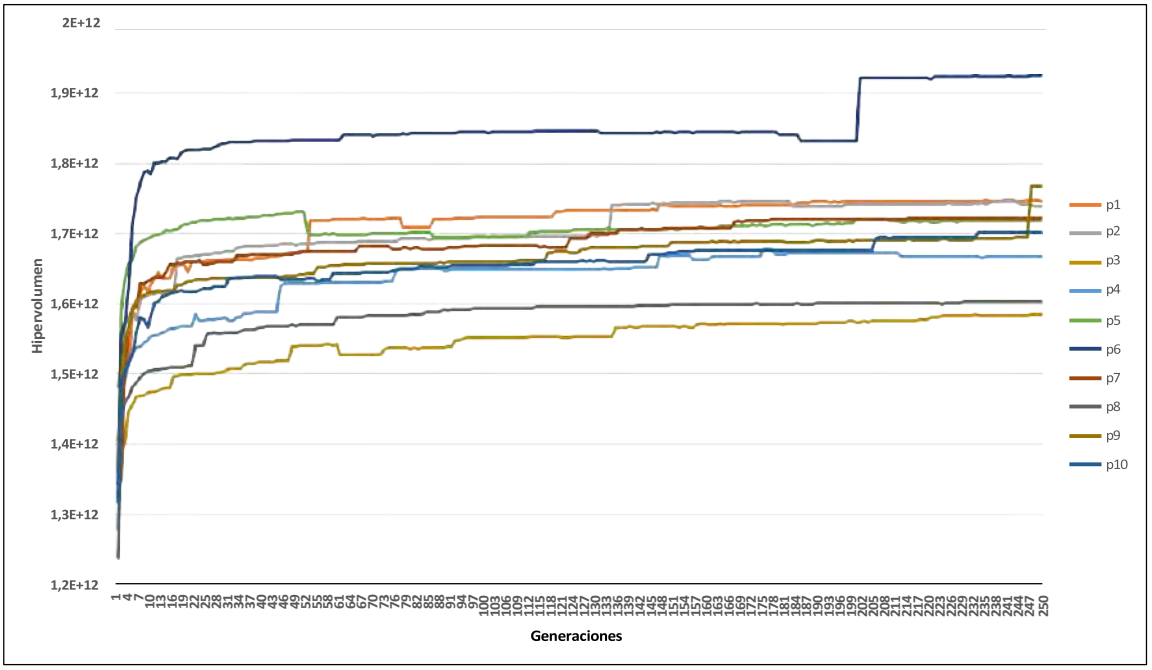



*Figura 3 Desempeño de la métrica de hipervolumen para 10 pruebas.*

En la Figura 4, se presenta el frente de Pareto obtenido (triángulos grises). En el eje *x* se muestra la demanda de consultas anuales, mientras que en el eje *y* primario se representa el costo total de la red. Para cada solución sobre el frente de Pareto, se incluyen etiquetas que indican la cantidad de nuevos CAPS establecidos y la cantidad de servicios habilitados en cada caso. Estos valores contemplan tanto los 11 CS existentes como los nuevos CAPS que se incorporan al sistema.

En la Tabla 2 se reportan las soluciones óptimas para cada uno de los objetivos analizados: demanda máxima (Solución 1) y costo mínimo (Solución 2), las cuales representan los extremos del Pareto. En la Figura 5 se muestra las localizaciones geográficas de la Solución 1. Los discos verdes representan las demandas totales de los centros instalados, mientras que la necesidad total en cada radio censal se visualiza en escala de rojos. El signo (+) indica la ubicación de los 11 CS existentes.

*Tabla 2 Resumen de resultados de las soluciones ideales.*

| | | Solución 1 | Solución 2 |
|---|---|---|---|
| Nuevos CAPS | | 28 | 9 |
| Servicios abiertos | | 272 | 113 |
| | **Necesidad** | **Demanda por servicio** | |
| Enfermería | 177.714 | 143.695 | 87.262 |
| Clínica médica | 13.488 | 10.907 | 5.630 |
| Pediatría | 56.207 | 45.453 | 26.081 |
| Ginecología | 17.155 | 13.866 | 8.061 |
| Obstetricia | 10.623 | 8.586 | 2.821 |
| Psicología | 16.248 | 12.765 | 7.092 |
| Odontología | 98.348 | 79.516 | 9.907 |
| **Consultas anuales** | 389.783 | 314.788 | 146.845 |
| **Costo total (USD)** | | 9.761.312 | 4.604.311 |

Las líneas verde y roja en la Figura 4 representan los valores normalizados de inequidad en la cobertura de la necesidad y de la carga laboral, respectivamente (Ecuaciones 12 y 13).

$$\overline{\overline{IN}}_{sol} = \frac{IN_{sol} - IN_{min}}{IN_{max} - IN_{min}} \quad (12)$$

$$\overline{\overline{IL}}_{sol} = \frac{IL_{sol} - IL_{min}}{IL_{max} - IL_{min}} \quad (13)$$

Ambas inequidades tienden a disminuir conforme se despliegan más centros en el territorio. En las soluciones con menos de 9 CAPS (137 servicios), una o ambas inequidades alcanzan sus valores máximos. En estos escenarios, pocos nodos de necesidad cuentan con CAPS a menos de 1500 m de distancia o carecen de una oferta completa de servicios. Desde la perspectiva de la carga laboral, algunos centros experimentan una alta demanda, mientras que otros tienen una carga significativamente menor.

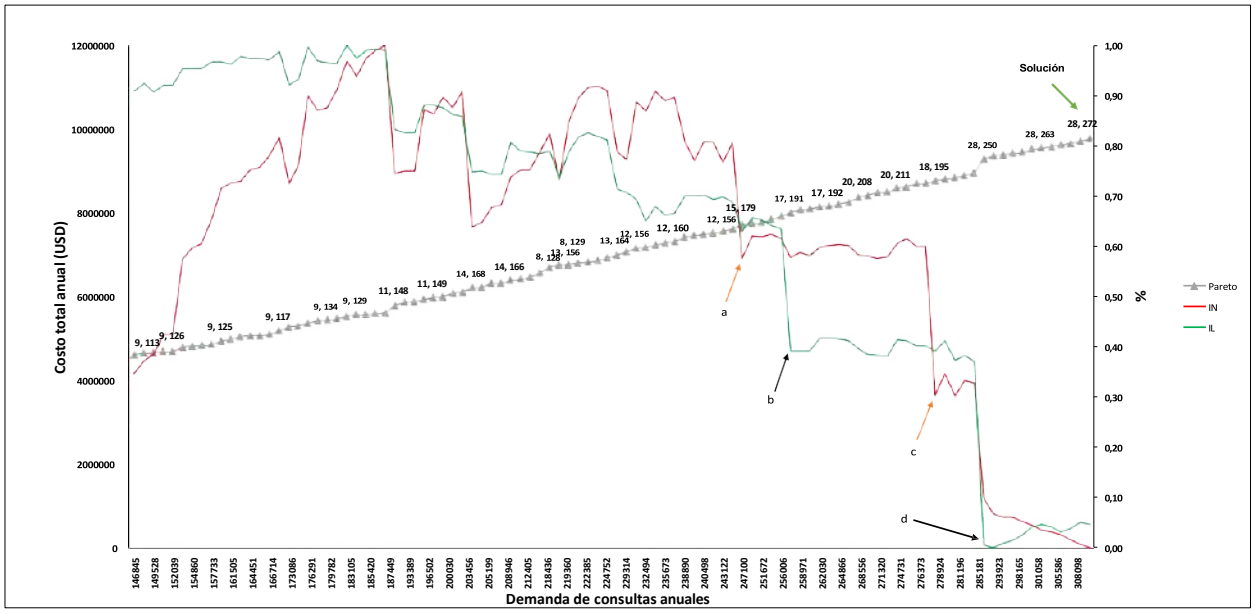



*Figura 4 Frente de Pareto demanda-costo e inequidades en cobertura y carga laboral.*

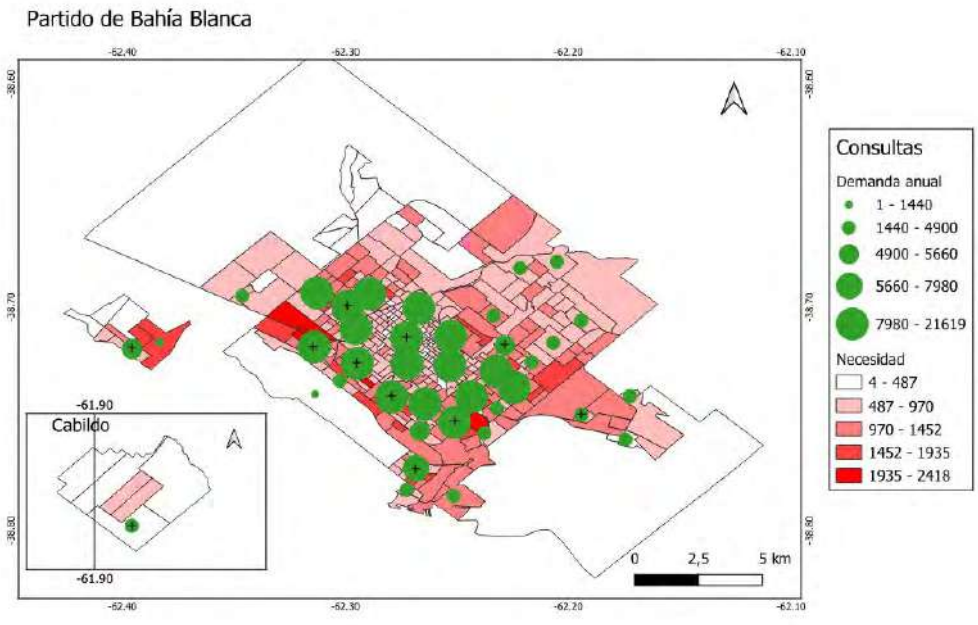



*Figura 5 Solución 1 con 28 nuevas CAPS.*

Por otro lado, en soluciones que incluyen más de 18 CAPS y más de 195 servicios habilitados, los valores de ambas métricas de inequidad en la cobertura de necesidad y en la carga laboral disminuyen a valores inferiores al 30% y 39% respectivamente. La solución más atractiva simultáneamente tanto por el nivel de demanda como por la reducción de ambas inequidades, es la Solución 1, en la que se abren 28 nuevos CAPS y se habilitan 272 servicios. Esta solución señalada con una flecha en el gráfico, se describe en detalle a continuación.

La Solución 1 permite cubrir un total de 314.788 consultas anuales. La cobertura promedio de consultas por servicio es del 81%, a excepción de psicología (79%), frente al 38% alcanzada en la Solución 2.

Un análisis detallado del frente de Pareto revela que, configuraciones con costos y demandas similares pueden presentar diferencias significativas en los niveles de inequidad. Esto refuerza la necesidad de considerar múltiples indicadores al seleccionar soluciones de compromiso u óptimas de Pareto (Figura 4, puntos a, b, c y d).

Conocer esta diversidad puede ser útil en escenarios con restricciones presupuestarias. Por ejemplo, se puede observar que en torno a un presupuesto de USD 8.750.000 y 279.000 consultas (punto c), si bien la inequidad en la carga laboral se mantiene prácticamente constante (38%), se produce una reducción significativa en la métrica de cobertura (60% a 32%). Otro ejemplo se observa en las soluciones en torno a los USD 7.500.000 y 257.000 consultas (punto b), donde la inequidad en la cobertura se mantiene aproximadamente al 60%, se produce una reducción abrupta en la inequidad de carga laboral en los centros (65% al 40%).

La elección entre las posibles alternativas dependerá de las prioridades establecidas por los tomadores de decisiones, ya sea privilegiar una mayor equidad en la cobertura de la necesidad o una mejor distribución en la carga laboral. En todos los casos, pequeños ajustes en el número y ubicación de los CAPS y servicios pueden generar mejoras sustanciales en las métricas de equidad.

Esta información es clave para los responsables de planificación, ya que facilita la selección de soluciones que equilibren eficiencia, cobertura y equidad según las prioridades locales. En contextos con restricciones presupuestarias, se pueden identificar soluciones dentro de segmentos específicos del espacio costo/demanda, priorizando los servicios según los criterios políticos definidos. Esta estrategia permite incorporar las perspectivas de actores claves -como autoridades municipales, profesionales de la salud y usuarios de servicios de atención primaria- en el proceso de toma de decisiones.

## 4. CONCLUSIONES

La metodología propuesta permite estimar la demanda de diversas estructuras del PNA considerando la distancia de desplazamiento de la población hacia los CAPS, así como los costos asociados. Para modelar la demanda, se empleó una función simple de predisposición al traslado, con una distancia máxima de 1500 m, y una función lineal decreciente a partir de los 500 m. Además, se utilizó un esquema de costos simplificado para evaluar las distintas alternativas.

Se estudió el PNA del partido de Bahía Blanca con datos actualizados de necesidad de consultas utilizando la información del censo 2022, y se aplicó el algoritmo evolutivo multiobjetivo NSGA-II. Este algoritmo permitió obtener soluciones en la frontera de Pareto, considerando además los indicadores adicionales de inequidad en la cobertura de la necesidad entre los radios censales y de la carga laboral entre CAPS.

Los resultados sugieren que la inequidad en la cobertura de la necesidad depende en gran medida de la distribución geográfica de los CAPS y la cantidad de servicios habilitados. Además, el estudio demuestra que, incluso cuando existen restricciones presupuestarias, es posible encontrar soluciones óptimas que logren un balance adecuado entre costos, demanda y equidad, lo que permite a los tomadores de decisiones seleccionar la opción más adecuada según las prioridades locales.

La solución seleccionada, que maximiza simultáneamente la demanda y las equidades, muestra que alrededor del 81% de la necesidad total que se manifiesta como demanda, según el modelo de predisposición al traslado utilizada.

Cabe destacar que las localizaciones geográficas propuestas para los CAPS pueden no ser viables en todos los casos debido a restricciones prácticas, como la necesidad de adaptar o construir infraestructuras específicas en cada radio censal seleccionado como óptimo. A pesar de esto, los

resultados obtenidos ofrecen una guía valiosa para la toma de decisiones sobre la ubicación de los centros y la cantidad de consultas a atender en los servicios ofrecidos.

En lo que respecta a trabajos futuros, se propone realizar una evaluación más ajustada de los costos. Aunque el modelo vigente contempla cuatro componentes principales (costos de personal, costos operativos de instalaciones, costos por consulta y costos de inversión en nuevas instalaciones), algunos de estos, como los costos operativos y de inversión, se calculan actualmente como proporcionales a los costos de personal. Estos componentes podrían ser desglosados con mayor detalle y evaluados utilizando metodologías específicas. Asimismo, los costos de personal podrían ser ajustados para reflejar la diversidad de modalidades laborales, que varían según la especialidad médica, el horario y las condiciones contractuales.

## 4. REFERENCIAS


Blanco, V., Marín, A., & Puerto, J. (2024). Intra-facility equity in discrete and continuous p-facility location problems. *Computers and Operations Research*, 162, 106487. https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106487

Bozorgi-Amiri, A., & Hosseinzadeh, A. (2018). Equitable multi objective model for public facility location using RLTP technique. *Journal of Industrial and System Engineering*, 11, 101-113. Available from: https://www.jise.ir/article_54917.html

Chanta, S., Mayorga, M. E., & McLay, L. A. (2014). The minimum p-envy location problem with requeriment on minimum survival rate. *Computer & Industrial Engineering*, 74, 228-239. https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.06.001

De Grande, P., & Salvia, A. (23 de 06 de 2025). *Poblaciones, Plataforma abierta de datos espaciales de Población de la Argentina.* Obtenido de Indicadores del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas, 2022: https://mapa.poblaciones.org/map/257701/#/@-38.597599,-62.015075,10z&r13791/l=3401!v2!a2!w00e5q

De Melo, M. K. (15 de Octubre de 2020). *Métricas de Avaliaçao de Desempenho de Algoritmos Multiobjetivo-Hipervolume*. Obtenido de Medium: https://maisamelo.medium.com/m%C3%A9tricas-de-avalia%C3%A7%C3%A3o-de-desempenho-de-algoritmos-multiobjetivo-hipervolume-660f441d2535

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast a elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation: a publication of the IEEE Neural Networks Council*, 6, 182-197. https://doi.org/10.1109/4235.996017

Elorza, M. E., Moscoso, N. S., & Blanco, A. M. (2022). Assesing performance in health care: A mathematical programming approach for the re-design of primary health care networks. *Socio-Economic Planning Sciences*, 84, 101454. https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101454

Elorza, M. E., Moscoso, N. S., Blanco, A. M., & Gentili, J. O. (2018). Estimating need, demand and supply in primary health care services: A local application in Argentina. *MEDICC Review*, 20, 36-44. https://doi.org/10.37757/MR2018.V20.N3.8

Gobierno de la Provincia de Buenos Aires. (s.f.). *Buenos Aires Resultados Definitivos por municipio, Año 2022.* Obtenido de la Dirección Provincial de Estadísticas de la Provincia de Buenos Aires. https://www.estadistica.ec.gba.gov.ar/dpe/images/Censo2022_Resultados_por_municipio_web_01_16_25.pdf

Portal de Gobierno Abierto del Municipio de Bahía Blanca. (s.f.). *Centros Vacunatorios*. Obtenido de https://gobiernoabierto.bahia.gob.ar/mapas/centrosmedicos/vacunatorios/

Instituto Nacional de Estadística y Censos [INDEC]. (2023). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022: Condiciones habitacionales de la población, los hogares y las viviendas* (1ª ed., Censo nacional de población, hogares y viviendas 2022; vol.4). Instituto de Estadísticas y Censos. https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/poblacion/censo2022_condiciones_habitacionales.pdf

Moreno, G. A., Moreno, M. S., & Blanco, A. M. (2024a). Análisis de redes de centros de atención primaria de la salud empleando simulación numérica y algoritmos genéticos. *AACINI-Revista Internacional De Ingeniería Industrial*, 4 (1), 43-56. https://riii.fi.mdp.edu.ar/index.php/AACINI-RIII/article/view/110/146

Moreno, G. A., Moreno, M. S., & Blanco, A. M. (2024b). Diseño de redes de atención primaria de la salud empleando optimización metaheurística multiobjetivo. *Memorias del congreso 53 JAIIO 53 JAIIO*: Jornadas Argentinas de Informática, Sociedad Argentina de Informática (SADIO) y Universidad Nacional del Sur (UNS), Simposio de Informática Industrial e Investigación Operativa (SIIIO), (vol. 10, núm. 14, pp. 43-56), ISSN: 2451-7496. https://revistas.unlp.edu.ar/JAIIO/article/view/18044/17712

Mousazadeh, M., Torabi, S. A., Pishvaee, M. S., & Abolhassani, F. (2018). Accessible, stable, and equitable health service network redesign: A robust mixed possibilistic-flexible approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 111, 113-129. https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.01.006

Obeidat, B., & Alourd, S. (2024). Healthcare equity in focus: bridging gaps through a spatial analysis of healthcare facilities in Irbid, Jordan. *International Journal for Equity in Health*, 23. https://doi.org/10.1186/s12939-024-02120-8

Pourrezaie-Khaligh, P., Bozorgi-Amiri, A., Yousefi-Badadi, A., & Moon, I. (2022). Fix-and-optimize approach for a healthcare facility location/network design problem considering equity and accessibility: A case study. *Applied Mathematical Modelling*, 102, 243-267. https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.09.022

Zheng, W., Liu, Y., & Doerr, B. (2022). A First Mathematical Runtime Analysis of the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II). *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 36(9), 10408-10416. https://doi.org/10.1609/aaai.v36i9.21283

# ANÁLISIS DE RIESGOS EN INSTALACIONES HOSPITALARIAS SEGÚN LA NORMA IRAM-ISO 31000: ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN Y LA TOMA DE DECISIONES

Gallegos, María Laura
Rubio, Débora (2) | Blume, Mario Orlando (3)
UTN - Universidad Tecnológica Nacional

**RESUMEN**

La seguridad del paciente en un entorno hospitalario se fundamenta en un marco complejo de procesos clínicos y de soporte. Si bien los riesgos inherentes a la atención médica, como los errores de medicación o diagnósticos, son ampliamente reconocidos, es necesario analizar un pilar a menudo subestimado, pero de vital importancia: la fiabilidad de la infraestructura y del equipamiento biomédico. La operatividad ininterrumpida de áreas críticas como quirófanos y unidades de cuidados intensivos (UCI) depende, entre otros, de la funcionalidad óptima de los sistemas eléctricos y del equipamiento biomédico. Cualquier falla en estos componentes no solo interrumpe los procesos asistenciales, sino que puede tener consecuencias directas en la vida de los pacientes. El presente trabajo de investigación expone una metodología de gestión sistemática para la gestión de riesgos técnicos, alineada con los principios y directrices de la norma IRAM-ISO 31000:2018. El enfoque comienza con un relevamiento exhaustivo de las amenazas potenciales, que incluyen desde cortes de energía y fluctuaciones de voltaje hasta problemas más imperceptibles como armónicos en la red y corrientes de fuga en los dispositivos médicos. Mediante la elaboración de una matriz de riesgo, se evalúa la probabilidad de ocurrencia y el impacto potencial de cada amenaza, permitiendo una priorización estratégica de las acciones de mitigación. Se propone un conjunto de acciones concretas, que abarcan desde la implementación de sistemas de respaldo redundantes (UPS y autogeneración) y la estabilización de la calidad de energía (reguladores de voltaje), hasta la adopción de esquemas de conexión de puesta a tierra (sistemas IT) para prevenir riesgos de electrocución y garantizar la continuidad del servicio ante una primera falla a tierra. Asimismo, se destaca la necesidad de establecer una cultura de seguridad integral a través de programas de mantenimiento predictivo, capacitación continua del personal y sistemas de notificación de incidentes.

**Palabras Claves:** gestión de riesgo, eventos adversos, seguridad del paciente, IRAM-ISO 31000

**ABSTRACT**

Patient safety is a cornerstone of modern healthcare, traditionally viewed through the lens of clinical practice, including medication administration, diagnostic accuracy, and surgical protocol. This report, however, argues for a fundamental expansion of this perspective. It posits that an often-underestimated yet vitally important pillar of patient safety is the reliability and resilience of a hospital's technical infrastructure, particularly its electrical systems and biomedical equipment. The uninterrupted functionality of life-critical areas like operating rooms and intensive care units (ICUs) is directly dependent on the seamless operation of this unseen backbone. This analysis identifies and examines a specific set of technical risks that can have catastrophic consequences, including power grid disturbances, electrical harmonics, and the insidious threat of leakage currents in medical devices. The report proposes a systematic, proactive methodology for managing these risks, grounded in the principles and guidelines of the international standard IRAM-ISO 31000. This framework advocates for a shift from reactive problem-solving to anticipatory risk mitigation. The core findings of this report highlight the unique vulnerabilities of the hospital environment. For instance, modern, energy-efficient equipment, while beneficial for sustainability, often introduces electrical harmonics that can disrupt sensitive medical devices. Similarly, the specific physiological state of a patient—sedated or incapacitated—transforms a minor electrical anomaly into a potentially lethal hazard. To counteract these threats, the report details key mitigation strategies. These include the implementation of redundant power systems, such as Uninterruptible Power Supplies (UPS) and emergency generators, and, most critically, the strategic deployment of Isolated Power Systems (IT systems) in high-risk patient care areas. These specialized systems are designed to maintain power continuity during a critical fault while simultaneously protecting patients from electrocution. The report concludes with actionable recommendations for healthcare administrators, facilities managers, and clinical staff to foster a comprehensive culture of safety. This includes moving towards predictive maintenance, continuous staff training, and the establishment of robust incident reporting systems to ensure that technical reliability is integrated into the very fabric of patient care.

**Keywords:** risk management, adverse events, patient safety, IRAM-ISO 31000

## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión de riesgos constituye un enfoque sistemático y continuo que busca identificar, evaluar y abordar los riesgos que puedan afectar a una organización. Este proceso implica identificar posibles amenazas o eventos adversos, evaluar su probabilidad de ocurrencia y su impacto, y posteriormente tomar medidas para reducir o controlar los riesgos.

En particular, los riesgos inherentes a la atención médica en un entorno hospitalario se fundamentan en un marco complejo de procesos clínicos y de soporte, tales como, por ejemplo, la atención médica, los errores de medicación o diagnóstico, entre otros. Sin embargo, se propone analizar un pilar a menudo subestimado, pero de vital importancia: la fiabilidad de la infraestructura y del equipamiento biomédico. La operatividad ininterrumpida de áreas críticas como quirófanos y unidades de cuidados intensivos (UCI) depende de la funcionalidad óptima de los sistemas eléctricos y del equipamiento biomédico. Cualquier falla en estos componentes no solo interrumpe los procesos asistenciales, sino que puede tener consecuencias directas en la vida de los pacientes.

El presente trabajo de investigación expone una metodología de gestión sistemática para la gestión de riesgos técnicos, inherentes a equipos médicos y riesgos eléctricos, por ejemplo, cortes de energía, fluctuaciones de voltaje, fallas de equipos, entre otros riesgos relevados, de modo de evaluar su probabilidad e impacto, y que permita tomar decisiones estratégicas basadas en una gestión del riesgo efectiva, alineada con los principios y directrices de la norma IRAM-ISO 31000:2018. Esto incluye el relevamiento y diagnóstico previo, el análisis de fuentes de información y referencia y la definición de acciones de mitigación concretas y medibles para reducir la exposición a estos riesgos, sintetizadas en una matriz de decisión.

La implementación de este enfoque, basado en la norma IRAM-ISO 31000, proporciona un marco robusto y sistemático para que la institución identifique, evalúe y monitoree los riesgos de manera continua, asegurando que las instalaciones eléctricas y el equipamiento biomédico operen de forma segura y eficiente y pueda replicarse en otros sectores, con miras a adoptar a futuro el enfoque de riesgos integral en la institución hospitalaria.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

La tecnología médica debe cumplir con requisitos de seguridad y eficacia, por lo que en algunos países la gestión de riesgos es un requisito regulatorio para registrar un equipo ante la autoridad reguladora del país. Como se citó en Guerrero Palma, en las últimas décadas, la implementación de sistemas de gestión de riesgos en el sector sanitario público ha cobrado una creciente relevancia a nivel internacional. Países como Reino Unido, Australia y Canadá, han desarrollado marcos normativos robustos que integran la gestión de riesgos dentro de sus mecanismos de control financiero hospitalario, avances que han contribuido a mejorar la eficiencia y resiliencia de sus instituciones. (Guerrero Palma et al, 2025)

En Argentina, la gestión de riesgos constituye un requisito regulatorio esencial para el registro y comercialización de equipos médicos ante la autoridad sanitaria Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica (ANMAT), conforme a la clasificación por riesgo intrínseco (Clase I a IV) establecida en normativas como la Disposición ANMAT N° 64/2025. No obstante, si bien la ANMAT ejerce un control post-comercialización a través del Sistema Nacional de Tecnovigilancia, este es de naturaleza reactiva, enfocado en la notificación de eventos adversos una vez ocurridos. Existe una brecha regulatoria significativa en el ámbito federal respecto a la obligatoriedad de implementar programas de gestión de riesgo operacional proactivo para el equipamiento médico en uso por parte de las instituciones de salud. Respecto a las instalaciones eléctricas, existe una normativa técnica exhaustiva (Reglamentación AEA 90364-7-710 para locales de uso médico) que especifica los requisitos de seguridad eléctrica, incluyendo la protección contra microchoque. Sin embargo, el problema subyace en la ausencia de una reglamentación de alcance nacional y uniforme que exija la verificación periódica obligatoria y el análisis de riesgo documentado de las instalaciones eléctricas en uso, quedando su cumplimiento mandatorio supeditado a la legislación de cada jurisdicción provincial.

La Norma IRAM ISO 31000:2018 establece los principios y las guías generales para la gestión del riesgo. En su apartado 2 “Términos y Definiciones”, define el riesgo como “*el efecto de la incertidumbre sobre el logro de los objetivos*”, aclarando que un efecto es un desvío respecto de lo esperado, ya sea positivo y/o negativo, que está caracterizado por referencia a eventos potenciales y sus consecuencias o a una combinación de ambos, y que se define en términos de la combinación de las consecuencias de un evento (incluyendo cambios en las circunstancias) y la probabilidad de ocurrencia relacionada. Además, menciona sus objetivos en diferentes aspectos: financieros, relativos a la seguridad y la salud, medio ambiente y su aplicabilidad en los diferentes planos como el estratégico, organizacional, relativos a proyectos, productos y procesos. Por ejemplo y para este caso de aplicación, reducir los eventos

adversos que puedan ocasionarse al paciente por el uso de equipos. A cuenta de ello, cabe mencionar que, el Grupo de Trabajo de Armonización Global (GHTF) informó que entre el 50 % y el 70 % de los incidentes con dispositivos médicos están relacionados con errores de ensamblaje, supresión de alarmas, conexiones incorrectas, uso indebido, selección incorrecta de parámetros de uso, programación incorrecta y fallos de monitorización. Por tal motivo, resulta indispensable comprender el contexto interno y externo de la institución e identificar a las “personas u organizaciones que pueden afectar, verse afectadas o considerarse afectadas por una decisión o actividad” (IRAM ISO 31000:2018) relevando sus expectativas y necesidades con el fin de orientar adecuadamente la gestión de riesgos, en este caso vinculada a las partes interesadas de las instalaciones hospitalarias.

## 3. METODOLOGÍA

Se utiliza como marco metodológico y referencia la norma IRAM ISO 31000:2018, la cual contiene un conjunto de directrices y principios internacionales que proporcionan un enfoque sistemático y estructurado para la identificación, evaluación, tratamiento y monitoreo de riesgos para todo tipo de organizaciones. El esquema que se presenta en la Figura 1 representa la metodología de base para el desarrollo del plan de gestión de riesgos y que abarca tres etapas sucesivas: identificación, análisis y valoración de riesgos. (IRAM ISO 31000:2018)

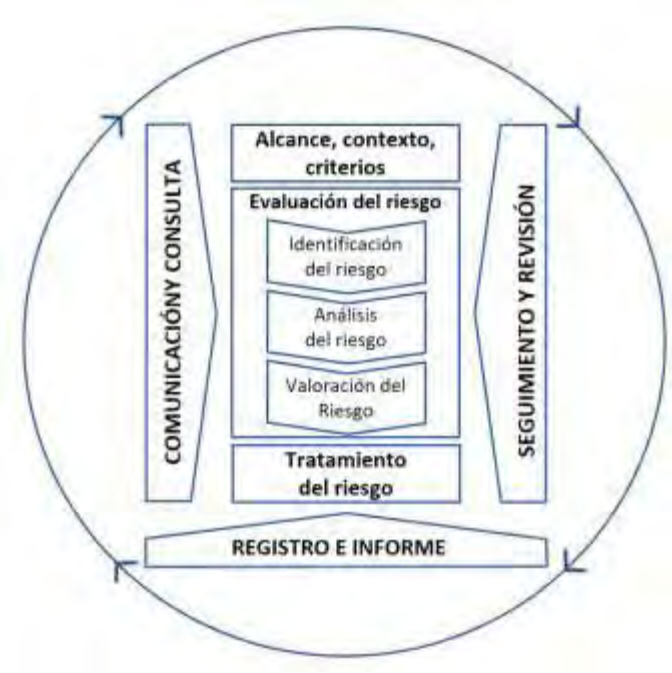



*Figura 1: Proceso de gestión de riesgo. Fuente: IRAM ISO 31000:2018*

### 3.1 El Proceso de Gestión del Riesgo Adaptado al Contexto Hospitalario

El proceso de gestión de riesgos se compone de varias etapas, que en el contexto hospitalario se traducen en acciones concretas.
El presente trabajo se fundamenta en la norma IRAM-ISO 31000:2018 como marco metodológico y de referencia. Esta norma, que no es certificable, proporciona un conjunto de directrices y principios internacionales que ofrecen un enfoque sistemático y estructurado para la gestión de riesgos en cualquier tipo de organización. El objetivo es ayudar a las organizaciones a proteger sus activos, cumplir con sus objetivos y mejorar la toma de decisiones, ya que, como se mencionó anteriormente, el riesgo se define como "efecto de la incertidumbre sobre el logro de los objetivos".
El proceso de gestión de riesgos según la Norma IRAM ISO 31000:2018 se describe en la Figura 1 y abarca un enfoque iterativo y dinámico que incluye las siguientes etapas clave:

- Comunicación y Consulta: Esta etapa implica involucrar activamente a las partes interesadas, compartir información relevante sobre los riesgos y crear conciencia sobre su importancia en todos los niveles de la organización.
- Establecimiento del Alcance, Contexto y Criterios: En esta fase, se define el alcance del proceso de gestión de riesgos, se identifican los factores internos y externos que podrían afectarlo y se establecen criterios claros para evaluar y priorizar los riesgos.

- Evaluación del Riesgo: Consiste en un subproceso de tres etapas sucesivas:
    - Identificación del riesgo: Se identifican de forma proactiva las amenazas y las oportunidades, como cortes de energía, fallas de funcionamiento en equipos médicos, y corrientes de fuga que se puedan originar en los equipos.
    - Análisis del riesgo: Se evalúa la probabilidad de ocurrencia y el impacto potencial de cada riesgo para la organización y sus objetivos.
    - Valoración del riesgo: Se compara el nivel de riesgo analizado con los criterios establecidos para tomar decisiones informadas sobre su tratamiento.
- Tratamiento del Riesgo: Una vez valorados, se aplican acciones de mitigación concretas, que pueden ser tanto preventivas (como protocolos y mantenimientos) como correctivas (formación del personal o rediseño de procesos), con el fin de reducir la exposición a los peligros identificados.
- Monitoreo y Revisión: Este proceso asegura la eficacia de las medidas implementadas y permite a la organización adaptarse a los cambios internos y externos para mejorar de forma continua. El monitoreo constante permite la detección temprana de nuevos riesgos.
- Registro y Reporte: Se mantiene una documentación y evidencia accesible y actualizada de todo el proceso de gestión de riesgos. Esto es crucial para la transparencia, la comunicación y la toma de decisiones estratégicas por parte de la alta dirección.

La aplicación de esta metodología proporciona un marco de acción robusto y sistemático para que la institución identifique, evalúe y monitoree los riesgos de manera continua, garantizando la continuidad de la atención asistencial y la máxima protección para la vida de los pacientes (Rubio et al, 2024).

## 4. DESARROLLO

El proceso de gestión de riesgos debe ser planificado, considerando la identificación, la evaluación y el tratamiento de los riesgos. La norma IRAM ISO 3100:2018 recomienda realizar un diagnóstico previo del contexto de la institución y de los grupos de interés intervinientes en el proceso, definir el alcance y los criterios principales de acción para luego profundizar en la evaluación de riesgos y finalmente establecer condiciones para su tratamiento. Se describen en los apartados siguientes los pasos realizados.

### 4.1 Alcance, contenido, criterios

El análisis de gestión de riesgos se planificó para una institución de salud polivalente, la cual presta una amplia gama de servicios médicos, entre ellos cirugías de pacientes adultos. La institución cuenta con modernos quirófanos, unidades de cuidados intensivos, servicios de urgencias y áreas de internación. Además, brinda atención ambulatoria para todas las especialidades médicas.

El estudio aplica a riesgos asociados al suministro eléctrico, entre los que se pueden encontrar los cortes de energía, fluctuaciones y picos de voltaje, distorsiones; y aquellos inherentes al equipamiento biomédico, tales como fallas y averías. En particular, por tratarse de una institución que brinda atención médica y quirúrgica y dada la necesidad de abordar incidentes y eventos adversos que afectan la calidad y la seguridad de la atención médica, principalmente en cuidados intensivos y quirófanos, la complejidad de los procedimientos y tratamientos requiere un enfoque sistemático y proactivo para identificar y mitigar los riesgos potenciales.

Para diseñar el programa de gestión de riesgos de la institución se consultó a las distintas partes interesadas del proceso, denominadas por su término en inglés *stakeholders* y que la norma IRAM ISO 31000:2018 define como “persona u organización que puede afectar, verse afectada, o percibirse como afectada por una decisión o actividad”. Con este propósito, se consideran en la institución de salud aquellas partes interesadas vinculadas al alcance, como los profesionales médicos, los servicios asociados, los pacientes, el personal de mantenimiento y de apoyo técnico, el comité de calidad de la institución, los fabricantes de equipos, los servicios de Salud (públicos y privados), las autoridades regulatorias y gubernamentales y pacientes. Se realizó un relevamiento de sus expectativas, necesidades y conocimientos como usuarios para identificar riesgos y relevar percepciones de gravedad y ocurrencia.

Luego y para un primer análisis se buscó identificar y comprender las cuestiones internas y externas intervinientes en el proceso a través de una matriz FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) como herramienta de diagnóstico de estrategias de acción, detectando las siguientes:

- Fortalezas, que incluyen el compromiso institucional de desarrollar un sistema de gestión de riesgos en la figura del comité de calidad, personal tanto clínico como técnico y de apoyo con vasta experiencia en la resolución de problemas de emergencia médica;

- Oportunidades, como el interés social y regulatorio por la seguridad del paciente, así como la accesibilidad a normativas y guías internacionales de referencia (OMS, IEC, ISO), el avance en

tecnologías de mantenimiento predictivo y el acceso a programas de financiamiento y subsidios para equipos e infraestructura;

- Debilidades*,* ausencia de planes de capacitación y entrenamiento formalizado del personal en la gestión de riesgos, prevalencia del mantenimiento correctivo sobre el predictivo, recursos escasos para nuevas tecnologías;

- Amenazas*, c*ortes de energía y problemas en la red, confiabilidad de los equipos biomédicos, obsolescencia tecnológica de equipos, riesgo legal por incidentes que comprometan la seguridad del paciente, eventos climatológicos extremos (tormentas, olas de calor, etc.).

### 4.2 Evaluación del Riesgo

El proceso de evaluación del riesgo involucra la identificación del riesgo, su análisis y su valoración. A continuación, se describen cada una de estas etapas.

#### 4.2.1 Identificación

En esta etapa se encuentran, reconocen y describen los riesgos. Para abordar el proceso de identificación de riesgos, como primer paso se realizó un relevamiento preliminar y diagnóstico de la situación actual**,** detallando la infraestructura existente. Esto incluyó una auditoría de la calidad del suministro eléctrico, la antigüedad y el estado de los equipos biomédicos, y una evaluación de los sistemas de respaldo y de protección existentes. Además, el análisis de datos internos del propio centro de salud, como informes de eventos adversos previos y experiencias prácticas del personal médico y de enfermería, que incluyó la consulta de informes de eventos adversos previamente registrados por el comité de calidad del centro. Las opiniones y comentarios del personal proporcionaron una visión más detallada de los posibles problemas, desafíos y oportunidades para mejorar la seguridad y la eficiencia en el uso de la tecnología. Este relevamiento constituyó la base para una comprensión precisa del nivel de exposición al riesgo de la institución, ya que tanto la calidad como la continuidad del suministro de energía son vitales para la operación hospitalaria, especialmente en áreas críticas por significar peligros potenciales para la salud del paciente. En este sentido, los principales riesgos identificados fueron los asociados al suministro eléctrico (tales como corte de energía, fluctuaciones y picos de voltaje y distorsiones) y aquellos inherentes al equipamiento biomédico (como por ejemplo fallas y averías o corrientes de fuga).

#### 4.2.2 Análisis del Riesgo

El propósito de esta etapa es comprender la naturaleza de los riesgos y sus características. El análisis implica el conocimiento de las incertidumbres, las fuentes de los riesgos, sus consecuencias, las probabilidades de ocurrencia, los eventos asociados, los posibles controles y la medición de su eficacia. Para el caso del presente estudio, se priorizaron los riesgos del suministro eléctrico y equipamiento biomédico relacionados con actividades más críticas, poniendo especial atención a aquellos asociados con los servicios de Cuidados Intensivos y Quirófano, y se describen sintéticamente a continuación:
*Riesgos ocasionados por suministro eléctrico:* son aquellos riesgos inherentes al flujo eléctrico, que pueden afectar la seguridad de las personas, la continuidad de las operaciones y la integridad de los equipos. Estos riesgos pueden derivarse tanto de fallas en el servicio externo (proveedor de energía) como de condiciones internas de las instalaciones, del mantenimiento realizado y del uso dado a los equipos.

- Cortes de Energía: constituyen las fallas más comunes. En un entorno de soporte vital continuo, un corte de energía total o una caída de tensión pueden ser catastróficos, ya que los equipos de soporte vital pueden reiniciarse o dejar de funcionar.
- Fluctuaciones de Voltaje: representan las variaciones breves o prolongadas en los niveles de voltaje, a menudo causadas por problemas en la red externa. Estas fluctuaciones pueden llevar al mal funcionamiento de equipos, errores de medición o daños físicos en los componentes electrónicos.
- Transitorios de Voltaje (Picos): son los aumentos repentinos y breves en el voltaje, causados por eventos como rayos o conmutaciones de circuitos. Los equipos médicos son particularmente vulnerables, y un pico de voltaje puede sobrecargar y dañar componentes sensibles, lo que resulta en fallas del equipo y la interrupción de tratamientos.
- Armónicos: representan las distorsiones en la forma de onda de la corriente eléctrica, generadas por equipos electrónicos que no consumen energía de manera lineal. En un hospital con gran cantidad de tecnología, la acumulación de armónicos puede causar sobrecalentamiento en el cableado, fallos en transformadores e interferir en el funcionamiento con la precisión de los dispositivos de medición.

*Riesgos asociados al equipamiento biomédico*: los equipos en sí mismos presentan riesgos inherentes, más allá de la red eléctrica, los cuales deben ser mitigados para cumplir con los requisitos de seguridad del paciente. Entre los más significativos encontramos:

- Corrientes de Fuga: Se trata de un flujo de corriente no deseado que escapa de su camino previsto hacia tierra. Aunque son de baja magnitud, son extremadamente peligrosas, especialmente en procedimientos invasivos que perforan la piel del paciente y eliminan su resistencia eléctrica. Una corriente de fuga de superior a 10 mA puede ser suficiente para causar daños graves en los pacientes. Estas corrientes pueden estar relacionadas con equipos defectuosos o instalaciones eléctricas deficientes.
- Fallas y Averías: Las averías inesperadas de los equipos biomédicos representa uno de los inconvenientes más comunes causado por problemas en la calidad de la energía o de mantenimientos preventivos o correctivos ineficientes. Cuando un equipo falla, el personal médico deberá utilizar equipos de respaldo o realizar procedimientos manualmente, lo que reduce la eficiencia y aumenta la probabilidad de errores.

Luego, se relevó la frecuencia probable (según diversas fuentes de información interna de la institución, como informes del comité de calidad, encuestas a usuarios de tecnología médica e informes de eventos adversos) y se estimó la probabilidad de ocurrencia (estimando el manual del fabricante, el historial de mantenimiento del equipo y el nivel de capacitación de los usuarios de la institución médica).

### 4.2.3 Valoración del riesgo

La matriz de riesgo es una herramienta dinámica que permite identificar, clasificar y monitorear los riesgos de manera continua. La matriz no es simplemente una tabla, sino el motor de la gobernanza de riesgos, ya que traduce los hallazgos técnicos en una métrica (probabilidad x Impacto) lo cual facilita la toma de decisiones estratégicas. Para su elaboración, se clasificaron los riesgos según la probabilidad de ocurrencia y severidad, estimando su impacto utilizando la ecuación (1),

$$I = P.S \qquad (1)$$

*donde*

*P,* es la probabilidad de ocurrencia del riesgo en un momento dado*,*

*S* es la severidad, que corresponde al nivel de gravedad del evento,

*I es* su impacto, estimado a partir del producto entre la probabilidad y la severidad del riesgo.

Las tablas 1 y 2 presentan las escalas de valoración definidas para calificar los riesgos identificados considerando su nivel de ocurrencia y su nivel de gravedad o severidad utilizando como referencia la Norma ISO 14971:2019.

*Tabla 1: Nivel de ocurrencia. Fuente: Elaboración propia, adaptado de ISO 14971:2019 "Dispositivos médicos - Aplicación de la gestión de riesgos a los dispositivos médicos"*

| Categoría | Descripción del Nivel de Ocurrencia | Nivel de ocurrencia |
|---|---|---|
| Frecuente | Es seguro que ocurrirá y/o tendrá consecuencias significativas | 5 |
| Ocasional | Es casi seguro que sucederá y /o que tendrá importantes consecuencias | 4 |
| Remoto | Es probable que ocurra y/o tendrá graves consecuencias | 3 |
| Probable | Puede ocurrir y/o tendrá consecuencias moderadas | 2 |
| Poco probable | Es poco probable que ocurra y/o tenga efectos menores o insignificantes | 1 |
| No aplicable | El evento no puede ocurrir en este contexto | 0 |

*Tabla 2: Nivel de gravedad. Fuente: Elaboración propia, adaptado de ISO 14971:2019 "Dispositivos médicos - Aplicación de la gestión de riesgos a los dispositivos médicos"*

| Categoría | Descripción del Nivel de Gravedad | Nivel de Gravedad |
|---|---|---|
| Extremo | Pérdida total del servicio y muerte del paciente | 5 |
| Crítico | Pérdida de la funcionalidad del área hospitalaria y amenaza grave de vida | 4 |
| Grave | Daño en el equipamiento que impacta en la operatoria clínica y requiere atención médica del paciente | 3 |
| Moderado | Daño en el equipamiento con interrupción mejor en la operación y que provoca malestar o daño reversible (sin dejar secuelas) | 2 |
| Leve | Sin impacto operacional significativo, que puede generar molestia leve o insignificante | 1 |
| Sin impacto | No genera daño operacional ni por consiguiente, daño clínico alguno | 0 |

La matriz de riesgos articula dos dimensiones principales: la probabilidad de ocurrencia del riesgo y su impacto potencial, mediante la asignación de colores para favorecer la gestión visual, según el nivel de combinación de estos factores en referencia a las siguientes parametrizaciones: Rojo: criticidad extrema; Anaranjado: criticidad moderada; Amarillo: Criticidad Tolerable; Verde: Criticidad Trivial. El mapa de calor resultante (figura 5), permite analizar riesgos según estos parámetros y habilita a la tomar decisiones desde el pensamiento en el riesgo, según:

- Rojo (riesgo crítico o extremo), que requieren acción inmediata y evaluación técnica urgente;
- Anaranjado, de riesgo alto, aquellos que requieren atención prioritaria y acción mediante plan de mitigación;
- Amarillo, de riesgo moderado, aquellos que requiere atención planificando acciones de mejora;
- Verde, de bajo riesgo, aquellos que requieren monitoreo regular.

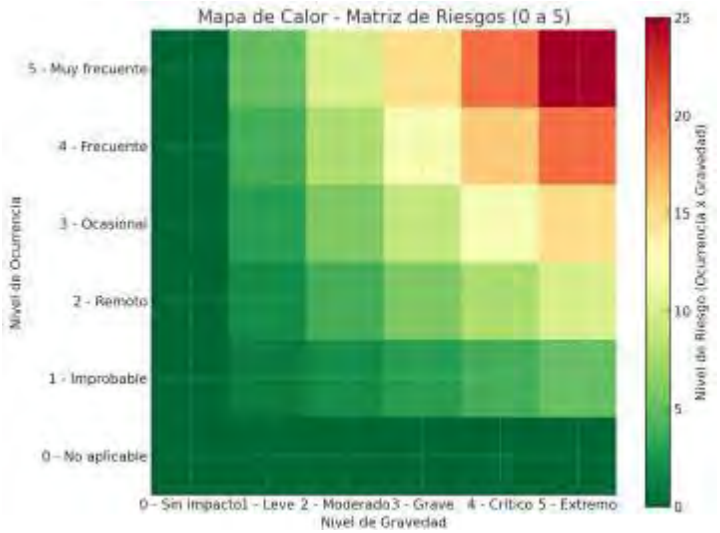



*Figura 2: Mapa de calor. Fuente: Elaboración Propia adaptado de ISO 14971:2019 "Dispositivos médicos - Aplicación de la gestión de riesgos a los dispositivos médicos"*

La Tabla 3 muestra la matriz con los riesgos identificados como de mayor impacto y su valoración, que requieren puntos de control para la detección y acciones para la toma de decisiones.

*Tabla 3: Fuentes de riesgo, riesgos y valoración. Fuente: elaboración propia.*

| Identificación y Análisis del riesgo | | | Valoración | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Riesgo** | **Fuente de riesgo** | **Evento** | **Severidad** | **Probabilidad** | **Impacto** |
| Falta de conexión de electrodo de retorno | Unidad electroquirúrgica | Lesiones en tejidos por electricidad | 4 | 4 | 16 |
| Descarga eléctrica, corrientes de fuga | Unidad electroquirúrgica | Lesiones por descarga eléctrica, quemaduras | 5 | 3 | 15 |
| Mal uso del equipo, configuración incorrecta | Unidad electroquirúrgica | Daños en tejidos, estructuras subyacentes | 4 | 2 | 8 |
| Falla de generadores de emergencia, sobrecargas en los circuitos | Suministro Eléctrico | Daño en pacientes conectados a equipos de soporte de vida | 5 | 2 | 10 |
| Conexiones a tierra inadecuadas y fallas de aislamiento | Instalación eléctrica de áreas críticas | Daño a pacientes, riego de sufrir lesiones cardiológicas graves | 5 | 3 | 15 |
| Sobre carga en circuitos eléctricos o fallas eléctricas | Tableros de instalación eléctrica | Pueden generar calor excesivo y desencadenar incendios | 5 | 2 | 10 |

### 4.3 Tratamiento del riesgo y acciones de mitigación

Una vez que los riesgos han sido identificados y evaluados, es posible diseñar e implementar acciones de mitigación específicas y medibles para reducir la exposición a dichos peligros. En la Tabla 4 se sintetizan las soluciones técnicas planteadas y las áreas de aplicación para los riesgos identificados con mayor impacto.

*Tabla 4: Acciones de mitigación para riesgos severos. Fuente: elaboración propia.*

| Riesgo | Solución Técnica | Función Principal | Área de Aplicación |
|---|---|---|---|
| Cortes de energía prolongados | Plantas de Emergencia (Generadores) | Respaldo de energía a largo plazo | Todo el hospital, sistemas críticos |
| Cortes de energía, fluctuaciones, transitorios | Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (UPS) | Respaldo inmediato y estabilización de voltaje | Quirófanos, UCI, Terapias, Equipos críticos |
| Fluctuaciones de voltaje, transitorios | Reguladores de Voltaje | Estabilización en tiempo real de la tensión | Quirófanos, UCI, Salas de diagnóstico, Laboratorios |
| Corrientes de fuga, electrocución, primera falla a tierra | Sistemas de Alimentación IT (Aislados) | Aislamiento de la red eléctrica de tierra | Quirófanos, UCI, Áreas de procedimientos invasivos |
| Fallas a tierra, corrientes de fuga | Monitores de Aislamiento (LIM) y Corriente Residual (RCM) | Detección predictiva de fallas de aislamiento | Quirófanos, UCI, Paneles eléctricos críticos |

Las soluciones de mitigación técnica operan en capas, esto es creando una arquitectura para garantizar la continuidad del servicio incluso ante múltiples fallas. Se describen a continuación los sistemas de respaldo y continuidad, sistemas de regulación de voltaje, esquema de conexión IT y sistemas de monitoreo continuo propuestos para el diseño.
Un sistema de respaldo redundante es la solución más crítica para mitigar cortes de energía. Una planta de emergencia como por ejemplo un generador, si bien, proporciona una fuente de energía a largo plazo, su tiempo de arranque (entre 10 y 60 segundos) no es suficiente para los equipos de soporte vital. Los sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) son la capa de protección inmediata, ya que se activan en menos de 5 milisegundos para garantizar que la transición al generador sea imperceptible para el equipamiento. Se recomienda para áreas críticas la redundancia de:

UPS + planta de emergencia + regulación activa

Las fluctuaciones y transitorios de voltaje pueden ser tan perjudiciales como un corte total. Los reguladores de voltaje permiten estabilizar la red eléctrica en tiempo real, protegiendo a los equipos sensibles de las variaciones comunes y previniendo posibles daños progresivos en los componentes electrónicos. Además, permite asegurar la precisión de los dispositivos de medición.
Los esquemas de conexión a tierra IT son un elemento trascendente de la seguridad eléctrica para entornos de alto riesgo como quirófanos y UCIs. En un esquema IT la red eléctrica está aislada de tierra mediante un transformador de aislamiento, lo que impide que una corriente de fuga fluya a través del paciente incluso si se produce un contacto con un conductor energizado. Un esquema IT garantiza la continuidad del servicio incluso en caso de una primera falla de aislamiento, permitiendo que la operación continúe sin interrupción mientras la misma se localiza.
Finalmente, la transición progresiva del mantenimiento correctivo al predictivo constituye una ventaja estratégica. Los monitores de aislamiento (LIM) y los relés de monitoreo de corriente residual (RCM) permiten la detección temprana de fallas a tierra, midiendo la resistencia de aislamiento y alertando al personal ante fallas críticas sin necesidad de desconectar el sistema.
La tabla siguiente resume acciones y puntos de control propuestos para la detección y gestión de riesgos descritos en la Tabla 3 con responsables encomendados a la tarea.

*Tabla 4: Acciones de mitigación para riesgos severos. Fuente: elaboración propia.*

| Riesgo | Fuente de riesgo | Evento | Impacto | Acciones | Detección/ Punto de control | Responsable |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Falta de conexión de electrodo de retorno | Unidad electroquirúrgica | Lesiones en tejidos por electricidad | 16 | Usar electrodos desechables, reemplazo del equipo electroquirúrgico, adquirir equipos con sistemas de seguridad | Checklist preoperatorio, test de alarma y conexión | Jefe de Quirófano / Ingeniero Clínico |
| Descarga eléctrica, corrientes de fuga | Unidad electroquirúrgica | Lesiones por descarga eléctrica, quemaduras | 15 | Realizar mantenimiento preventivo y controles de seguridad eléctrica y rendimiento | Verificaciones de seguridad eléctrica del equipo | Jefe de Ingeniería Clínica |
| Mal uso del equipo, configuración incorrecta | Unidad electroquirúrgica | Daños en tejidos, estructuras subyacentes | 8 | Capacitación del usuario | Capacitaciones programadas | Jefe de recursos humanos/ Jefe de quirófano |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fallos en los generadores de emergencia, sobrecargas en los circuitos | Suministro Eléctrico | Daño en pacientes conectados a equipos de soporte de vida | 10 | Disponer de equipos de energía alternativa, grupos electrógenos | Alarmas de cortes de energía | Jefe de mantenimiento / Ingeniería |
| Conexiones a tierra inadecuadas y fallas de aislamiento | Instalación eléctrica de áreas críticas | Daño a pacientes, riego de sufrir lesiones cardiológicas graves | 15 | Instalación de transformadores y monitores de aislación para áreas críticas hospitalarias | Monitoreo de aislación de las instalaciones eléctricas | Jefe de Ingeniería/ Mantenimiento |
| Sobre carga en circuitos eléctricos o fallas eléctricas | Tableros e instalación eléctrica | pueden generar calor excesivo y desencadenar incendios | 10 | Realizar mantenimientos programados de las instalaciones eléctricas | Mediciones de las instalaciones eléctricas | Jefe de mantenimiento / Ingeniería |

### 4.4 Registro e informes

La norma IRAM-ISO 31000 enfatiza la integración de la gestión de riesgos en todos los niveles, enfatizando en responsabilidad de la Dirección. La Dirección y responsables de la hospitalaria promueven la incorporación de buenas prácticas y su formalización en información documentada como procedimientos de trabajo e instructivos, lo que permite estandarizar metodologías y acciones de rutina para una mejor detección y su gestión. Dichas buenas prácticas se socializan y sostienen en la capacitación continua del personal sanitario y no sanitario para fomentar una cultura de enfoque a riesgos, que, al identificarlos, permiten al personal operar el equipo correctamente y responder de manera efectiva ante un incidente para seguridad del paciente. La generación y uso de listas de chequeo colabora como mecanismo *poka yoke* (a prueba de errores) para realizar actividades ligadas a la toma de decisiones. También, los sistemas de notificación de incidentes, que permiten establecer un sistema de notificación simple y confidencial para que el personal reporte falla menores o cuasi incidentes, facilitando la identificación y análisis de causas raíz para el planteo de acciones de mejora.

## 4. CONCLUSIONES

En el contexto de la salud, la gestión de riesgos y la toma de decisiones asociada, cobra especial relevancia, ya que está directamente relacionada con la seguridad del paciente y la calidad de la atención médica. Mediante la implementación de estrategias y acciones para minimizar los efectos negativos de los riesgos vinculados a instalaciones eléctricas y equipos biomédicos identificados, se promueve un entorno más seguro en el centro de salud y se protege la integridad de quienes reciben la atención médica en el mismo.

La gestión del riesgo fundamentada en un marco de referencia como la IRAM-ISO 31000, posibilita a una institución de salud, la búsqueda de la mitigación de eventos adversos, y reducir la probabilidad de que las fallas técnicas escalen a incidentes que causen daños, o incluso la muerte, a los pacientes. En este sentido, permiten brindar garantía para la continuidad de la atención, procurando la no interrupción de procedimientos asistenciales críticos, mejorando la continuidad operativa, seguridad y eficiencia organizacional.

Las acciones recomendadas para el caso de la institución hospitalaria, subrayan la importancia de centrarse en la verificación de los equipos médicos, el mantenimiento y monitoreo, así como la capacitación continua de los usuarios para mitigar los riesgos asociados al uso de la tecnología médica evitando costos por equipos dañados por fallos eléctricos, de modo de garantizar un entorno más seguro y eficiente para el bienestar de sus pacientes y el personal médico, lo que implica continuar con intervenciones para dar seguimiento y asesoría para la implementación.

El enfoque sistemático de la gestión del riesgo técnico para la toma de decisiones, transforma la incertidumbre en una oportunidad estratégica, con un pilar innegociable en la atención de salud como es la salud de las personas.

## 5. REFERENCIAS


Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica. ANMAT (2025). Disposición 64/2025: Incorporación de la Resolución GMC N° 25/21 al ordenamiento jurídico nacional. Boletín Oficial de la República Argentina, 35.586.
Recuperado en: https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/disposicion-64-2025-408309.

Asociación Electrotécnica Argentina. AEA (2024). Reglamentación para la ejecución de instalaciones eléctricas en inmuebles: Parte 7, Sección 710 – Locales para usos médicos y salas externas. AEA. https://aea.org.ar/noticias/aea-90364-7-710-nueva-edicion

Guerrero Palma, L. E., García Holguín, C. D., & Luján Johnson , G. L. . (2025). Gestión de riesgos en la implementación del control previo en hospitales públicos. Una revisión conceptual. Revista Vive, 8(23), 733–749. https://doi.org/10.33996/revistavive.v8i23.408

International Organization for Standardization. (2019). Medical devices — Application of risk management to medical devices (ISO Standard No. 14971:2019). https://www.iso.org/standard/72704.html

Organismo Internacional de Normalización y Acreditación. IRAM (2018). Gestión del riesgo: Directrices (Norma IRAM ISO 31000:2018).

Rubio, D., Salguero, M. G., Castañeira, M., Ponce, S., & Madrid, F. (2024). Risk management program applied to the use of biomedical technology. En F. E. Ballina et al. (Eds.), IFMBE Proceedings: Vol. 114. SABI 2023 (pp. 325–337). Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61973-1_31

# REALIDAD AUMENTADA E INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADAS A LA INGENIERÍA DEL SOFTWARE: UNA SOLUCIÓN EDUCATIVA E INDUSTRIAL CLAVE

Fernández, José A.; Martínez Alarcón, Gabriel; Médula, Nicolás; González Junior, Mario; Romero, Gilda R.

*Facultad de Ingeniería, Tecnología y Arquitectura, Universidad de la Cuenca del Plata*
*fernandezjose_cen@ucp.edu.ar; romerogilda_cen@ucp.edu.ar*

**RESUMEN**

Las tecnologías exponenciales, principalmente la Inteligencia Artificial (IA) y la Realidad Aumentada (RA), están transformando los procesos productivos, industriales, educativos y organizacionales, potenciando la innovación en áreas estratégicas como la ingeniería de software. Este trabajo se enmarca en una investigación aplicada de la Universidad de la Cuenca del Plata, sede Corrientes, cuyo objetivo es diseñar, desarrollar y validar una plataforma que integre IA y RA para asistir en la generación de código en múltiples lenguajes de programación, mediante visualizaciones contextuales e interacciones inmersivas. La hipótesis central es que estas tecnologías podrían mejorar significativamente la eficiencia y calidad del desarrollo de software, al facilitar la comprensión de estructuras lógicas complejas, promover la resolución contextual de errores y optimizar la toma de decisiones técnicas. El primer prototipo funcional desarrollado está siendo testeado en el contexto universitario buscando evaluar su aceptación y potencial de impacto entre estudiantes y docentes. Resultados preliminares indican una mejora en la experiencia de usuario y en los tiempos de depuración, así como una percepción positiva de utilidad e innovación. Este trabajo busca aportar evidencia sobre la viabilidad y escalabilidad de soluciones inmersivas particularmente en la construcción de software, abriendo líneas de investigación para su aplicación en contextos industriales más amplios.

**Palabras claves:** Inteligencia Artificial, Realidad Aumentada, Industria 5.0, educación, Formación profesional

**ABSTRACT**

Exponential technologies, particularly Artificial Intelligence (AI) and Augmented Reality (AR), are reshaping productive, industrial, educational, and organizational processes, fostering innovation in strategic domains such as immersive software engineering. This applied research, conducted at Universidad de la Cuenca del Plata (Corrientes, Argentina), aims to design, develop, and validate an AI–AR integrated platform that supports multi-language code generation through contextual visualizations and immersive interactions. The central hypothesis refers to: combining AI-assisted coding with AR-based visualization can substantially improve the efficiency, accuracy, and quality of software development by enhancing comprehension of complex logic structures, enabling real-time contextual debugging, and supporting informed technical decision-making. The first functional prototype has been implemented and is currently under evaluation within a university environment to measure adoption, usability, and perceived value among students and faculty. Preliminary findings reveal shorter debugging times, improved user experience, and a strong perception of innovation and usefulness. The study contributes empirical evidence on the feasibility, scalability, and potential industrial applicability of immersive AI–AR solutions for software development and outlines future research pathways for their deployment in broader engineering and industrial contexts.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Augmented Reality, Industry 5.0, education, Engineering Education

## 1. INTRODUCCIÓN

En el marco de la sociedad del conocimiento, las tecnologías exponenciales tales como la Inteligencia Artificial (IA) y la Realidad Aumentada (RA), están redefiniendo la forma en que se producen, gestionan y utilizan los datos. Peter Drucker (1993) anticipó que *"el conocimiento se ha convertido en el recurso económico clave y en la ventaja competitiva fundamental en la sociedad poscapitalista"*. Posteriormente, Castells (2000) sostuvo que *"la característica distintiva de la nueva economía es que está organizada en torno a redes de información, comunicación y generación de conocimiento"*. Estas tecnologías, desde su introducción en las realidades sociales alrededor del mundo, han demostrado su influencia sobre diferentes sectores de la vida cotidiana: ingenierías, seguridad, salud, educación, marketing, entre otros.

Dentro de estas transformaciones, la Realidad Aumentada (RA) ha emergido como una tecnología innovadora con el potencial de transformar diversas industrias: salud (Topol, 2019), seguridad (Bostrom, 2014), educación (Bower et al., 2014) y marketing, entre otras. En el campo de la Ingeniería del Software, la articulación de IA y RA abre nuevas posibilidades para el desarrollo y la generación de software. En el contexto específico del desarrollo de software, las oportunidades significativas se refieren a enriquecer la producción de componentes, mejorar los tiempos de los entregables y estandarizar procesos que actualmente se realizan de manera alternativa, al combinar elementos virtuales con el entorno físico de hardware, proporcionando información contextualizada y mejorando la escritura de código y la interacción de los equipos de trabajo. Además, mejora la experiencia del desarrollador reduciendo el tiempo de capacitación, proporciona información contextualizada sobre recursos, dispositivos y datos, haciendo más eficiente la producción de software de calidad.

Este trabajo se enmarca en una investigación aplicada que se encuentra desarrollando en la Universidad de la Cuenca del Plata, sede Corrientes, denominada "*Explorando Conexiones a través de la Realidad Aumentada potenciada por Inteligencia Artificial en los entornos de programación y desarrollo de software*" (UCP, 2024). El proyecto, tiene por objetivo *diseñar, desarrollar y validar una plataforma que integre IA y RA para asistir en la generación de código en múltiples lenguajes de programación, mediante visualizaciones contextuales e interacciones inmersiva;* con el afán de contribuir a la producción de software local con potencialidad a ser replicado en otros contextos igualmente exigentes de códigos de calidad, eficiencia en tiempos y resolución de demandas de usuarios, impulsando la innovación y la competitividad del área informática y potenciando de esta manera la economía global.

El proyecto se alinea principalmente con el *Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 9: Industria, Innovación e Infraestructura*, ya que se busca construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación; y con el *ODS 4: Educación de Calidad*, proponiendo una nueva forma de aprender y enseñar programación, utilizando tecnologías avanzadas como la Realidad Aumentada y la Inteligencia Artificial. Este trabajo busca aportar evidencia sobre la viabilidad y escalabilidad de soluciones inmersivas particularmente en la construcción de software, abriendo líneas de investigación para su aplicación en contextos industriales más amplios.

Este trabajo presenta los avances del proyecto de investigación, considerando que el primer prototipo funcional desarrollado está siendo testeado en el contexto universitario, buscando evaluar su aceptación y potencial de impacto entre estudiantes y docentes. Los resultados preliminares contemplan una solución que integra RA con visualizaciones inmersivas, diseñada para contextos universitarios, pero con proyección hacia aplicaciones industriales.

La organización del artículo es de la siguiente manera: en la sección Proyecto, se detallan los antecedentes, la hipótesis y los objetivos de la investigación. En la sección Metodología, se describe el enfoque utilizado en el proyecto (enfoque ágil/iterativo), así como las herramientas empleadas. En el apartado de Resultados preliminares, se presentan los avances alcanzados, acompañados de algunas evidencias, y se presenta una Discusión donde se interpretan los hallazgos en relación con la literatura

especializada. Finalmente, en Conclusiones y líneas futuras, se sintetizan los aportes y se plantean proyecciones hacia aplicaciones educativas e industriales.

## 2. EL PROYECTO

El presente trabajo se enmarca en la investigación aplicada de la Universidad de la Cuenca del Plata (UCP), sede Corrientes, titulada "*Explorando Conexiones a través de la Realidad Aumentada potenciada por Inteligencia Artificial en los entornos de programación y desarrollo de software*"

### 2.1. Fundamentos del proyecto

Papert (1980) y Bers (2022) coinciden en que la programación debe ser considerada una forma de alfabetización esencial en la educación moderna, vinculando el aprendizaje de la programación con el desarrollo de habilidades cognitivas y socioemocionales. De hecho, Bers (2024) sostiene que la programación debería ser parte de una nueva alfabetización y la relaciona con los métodos y contenidos de las ciencias de la computación.

Por otro lado, la programación se moderniza y se alimenta de las nuevas tecnologías provocando una gran disrupción en la forma en que se genera código informático. Los lenguajes de programación incorporan herramientas que facilitan la producción, integración y eficiencia del código obtenido.

En la medida del avance de la tecnología, el hardware incorpora nuevos dispositivos que son disponibilizados como instrumentos facilitadores de las diferentes actividades profesionales cotidianas.

Considerando particularmente dispositivos de Realidad Aumentada, estos contribuyen a la integración de contenidos gráficos sobre una vista del mundo real. Para ello, se utilizan dispositivos como teléfonos móviles o gafas, que añaden la información virtual a la realidad que ve el usuario permitiendo combinar el mundo real y el virtual, ofrecer una interacción en tiempo real, adaptarse al entorno en el que se inserte e interactuar con todas las capacidades físicas del entorno (en tres dimensiones). Koutromanos y Kazakou (2023) realizan una revisión de la literatura sobre el uso y la aceptación de las Gafas Inteligentes de Realidad Aumentada (ARSGs), destacando su aplicación en diversos campos y resaltando que dichas ARSGs permiten la integración de contenidos gráficos sobre una vista del mundo real, facilitando la interacción en tiempo real con el entorno físico. La Realidad Aumentada genera muchas oportunidades y puede transformar por completo la forma en que se produce software rompiendo algunos paradigmas y formas de producción.

Este tipo de proyectos pretende estimular la actitud crítica, la capacidad de resolver problemas, la creatividad y el trabajo colaborativo entre estudiantes y docentes, constituyéndose en elementos fundamentales de las denominadas habilidades del siglo XXI.

### 2.2 Hipótesis de trabajo

La implementación de una plataforma de Realidad Aumentada para el desarrollo de software mejorará significativamente la actividad de los profesionales que se dedican a la producción de software al recibir información contextualizada y enriquecida, permitiéndoles enfocarse en las problemáticas funcionales, con un soporte para la programación sencillo, completo y eficaz mediante la IA y la RA.

### 2.3 Objetivo general y objetivos específicos

El objetivo general es *diseñar, desarrollar y validar una plataforma inmersiva basada en Realidad Aumentada e Inteligencia Artificial para asistir en la generación de código en múltiples lenguajes de programación.*

Los objetivos específicos incluyen:

- *Identificar las tecnologías de RA e IA más adecuadas para el contexto de programación.*
- *Optimizar el rendimiento y la compatibilidad multiplataforma de la aplicación.*

- *Diseñar una interfaz de usuario intuitiva y una experiencia inmersiva centrada en el usuario.*
- *Evaluar la aceptación y el impacto de la plataforma en el entorno universitario.*

### 2.4. Preguntas de investigación

Las preguntas de investigación son:

- *¿Cuáles son las tecnologías de RA más adecuadas para el contexto de desarrollo de sistemas de información?*
- *¿Cuáles son los desafíos específicos de integrar la RA, las metodologías de desarrollo de software y los lenguajes de programación?*
- *¿Cómo se puede garantizar la interoperabilidad y compatibilidad de las aplicaciones de RA en el contexto de la programación?*
- *¿Cuáles son las mejores prácticas para la seguridad y privacidad de los datos en aplicaciones de RA considerando la producción de software para terceros?*
- *¿Cómo influyen la interfaz y la experiencia de usuario en la adopción del producto diseñado y en el nivel de satisfacción con la aplicación de la RA, por parte de los programadores y en un contexto inclusivo?*
- *¿Cuáles son los impactos potenciales de la aplicación de RA en la infraestructura tecnológica existente y en los recursos humanos en cuanto a producción, capacitación y soporte a sus actividades?*

## 3. METODOLOGÍA

El proyecto adopta un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo), estructurado en cuatro fases principales:

1. revisión de literatura (revisión bibliográfica sobre frameworks de RA (WebXR, AR.js, Three.js) y su integración con motores de IA),
2. desarrollo incremental de la plataforma bajo metodología ágil,
3. pruebas de usabilidad y validación técnica, y
4. evaluación mediante encuestas y entrevistas semiestructuradas a usuarios.

En este sentido, considerando los resultados esperados, se incluye:

- **Diseño y desarrollo** del prototipo funcional con una interfaz RA visual. La Figura 1 detalla el diagrama del modelo conceptual de la plataforma.

- **Prototipado**: construcción de demos funcionales de RA/VR con Oculus Quest y entornos web multiplataforma.

- **Validación**: aplicación de encuestas a estudiantes y docentes mediante un cuestionario con cinco dimensiones (utilidad percibida, facilidad de uso, disfrute percibido, actitud hacia el uso, e intención de adopción).

- **Instrumentos**: escala tipo Likert (A = en total desacuerdo a E = totalmente de acuerdo), complementada con datos sociodemográficos.

- **Ejecución**: adopción de un esquema ágil con solapamiento de fases, que permitió obtener resultados tangibles en etapas tempranas.

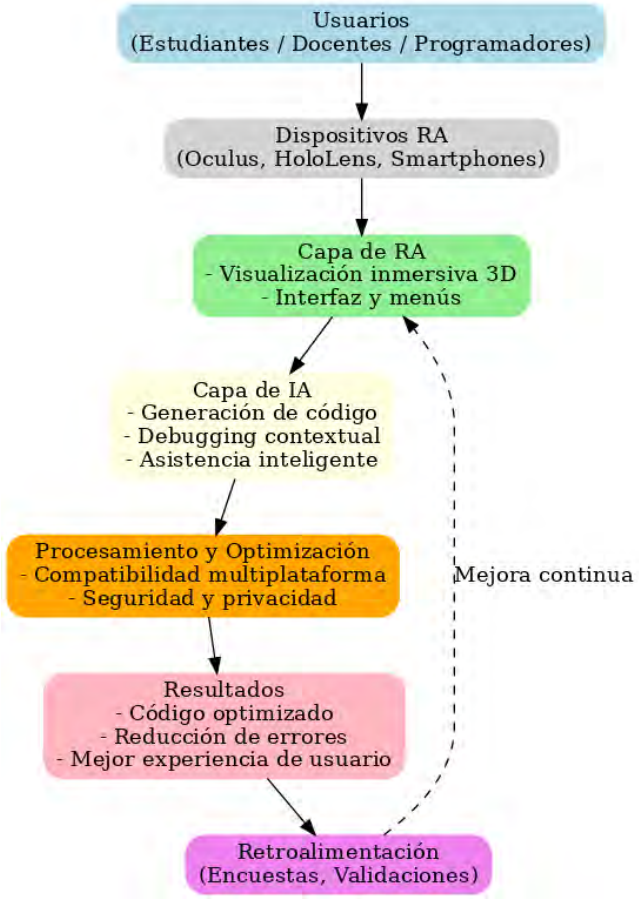



Figura 1 - Diagrama del modelo conceptual de la plataforma

En términos de la ejecución, la investigación ha adoptado un enfoque ágil e iterativo, basado en entregas parciales de valor y validaciones progresivas. "*La gestión ágil es un enfoque flexible e iterativo para la gestión de proyectos que enfatiza la adaptabilidad, la colaboración y la orientación al cliente"* (Chukwunweike & Aro, 2024).

## 4. RESULTADOS PRELIMINARES Y DISCUSIÓN

A la fecha, los resultados alcanzados permiten observar avances significativos en la consecución de los objetivos planteados. Si bien la investigación se encuentra en curso, se dispone de un prototipo funcional con validaciones preliminares con usuarios (en evaluación), lo que permite ofrecer una primera aproximación al impacto de la plataforma. Los hallazgos no solo confirman la pertinencia de las tecnologías seleccionadas, sino que también evidencian el potencial de la RA y la IA como herramientas de apoyo en la enseñanza y práctica de la Ingeniería del Software.

Dentro del año de trabajo, se destacan los siguientes resultados preliminares:

- *Prototipo educativo.* El primer prototipo incluye escenas inmersivas para la enseñanza de disciplinas exactas, por ejemplo, en Análisis Matemático (Figura 2), facilitando la comprensión de estructuras lógicas y visualizaciones complejas.




Figura 2 - Escena inmersiva en 3D desarrollada para la enseñanza de *Análisis Matemático*, implementada en prototipos de RA/VR

- *Transparencia y replicabilidad.* La apertura del código mediante repositorios GitHub refuerza la transparencia científica y permite la replicación en otros contextos académicos e industriales.

- *Validación con usuarios.* Las pruebas de uso con estudiantes y docentes utilizando visores Oculus Quest (Figura 3) evidencian la aceptación preliminar y la percepción de utilidad de la herramienta.



Figura 3 - Pruebas de uso del visor Oculus Quest con becarios y docentes de la UCP durante la etapa de validación preliminar.

- *Aplicabilidad pedagógica/andragógica***.** El desarrollo de entornos aumentados, como el que permite representar funciones matemáticas en 3D (Figura 4), demuestra el potencial pedagógico de la plataforma en contextos universitarios.

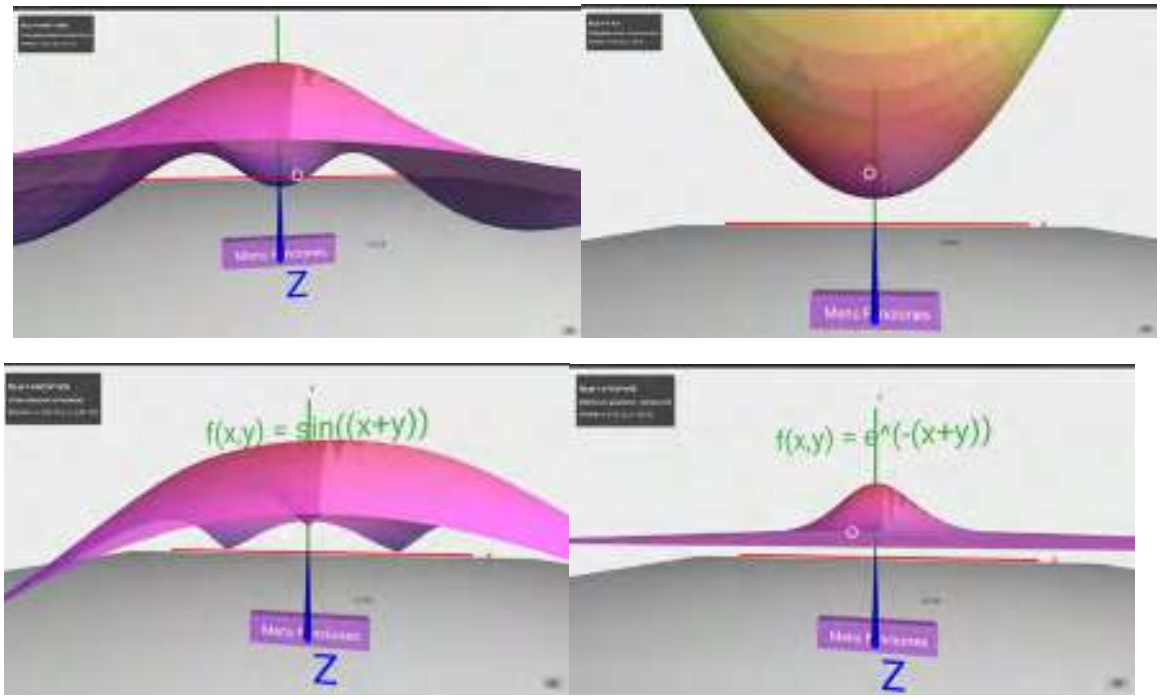



Figura 2 - Escena inmersiva en 3D desarrollada para la enseñanza de *Análisis Matemático*, implementada en prototipos de RA/VR

- *Apertura metodológica.* La estrategia ágil permitió obtener avances tangibles antes de lo previsto, en la comparación entre plan y ejecución.

En conjunto, se estima un avance global del 45%, con mayores logros en la selección tecnológica y en los prototipos iniciales, y desafíos pendientes en seguridad, integración de hardware y evaluación de impacto.

En resumen, los primeros testeos realizados en el entorno universitario con estudiantes y docentes revelan mejoras en los tiempos de depuración, mayor comprensión de la lógica de los algoritmos y una experiencia de usuario valorada positivamente. La interfaz busca ser intuitiva, por lo que se busca desarrollar las sugerencias para focalizar la atención en los aspectos funcionales del código, reduciendo errores comunes.

Los resultados preliminares refuerzan la viabilidad de integrar IA y RA en la programación, destacando tres aspectos principales:

1. Consolidación de la base tecnológica, desarrollo de prototipos funcionales y percepción positiva de utilidad e innovación entre usuarios. (Fortaleza).

2. Retrasos en seguridad y protección de datos, limitaciones en la integración robusta de hardware y necesidad de mayor maduración en la validación empírica (Debilidad).

3. Adopción de una estrategia ágil metodológica que permitió acelerar fases y obtener resultados visibles tempranos, lo que fortalece la visibilidad académica de la institución y anticipa el impacto del proyecto en la comunidad científica (Innovación metodológica).

## 5. CONCLUSIONES

El desarrollo de soluciones inmersivas que integren RA e IA se presenta como una estrategia viable para mejorar tanto los procesos de enseñanza aprendizaje como los procesos productivos en el ámbito de las industrias en general.

El enfoque iterativo adoptado para desarrollar el proyecto de investigación, permite acelerar el impacto académico y tecnológico del proyecto, aportando un modelo innovador de investigación aplicada, que genera resultados visibles y reutilizables desde las etapas iniciales, ya que la producción de prototipos tempranos no sólo acelera la validación empírica, sino que también ofrece evidencia concreta y reutilizable en las primeras etapas, fortaleciendo así la visibilidad académica y la transferencia tecnológica.

El proyecto se encuentra desarrollándose en línea con lo preestablecido con los ajustes pertinentes a las tecnologías con las que se trabaja y con la inexperiencia de los estudiantes que participan por primera vez en un proyecto de investigación. Los resultados preliminares del prototipo y los testeos realizados en el entorno universitario con estudiantes y docentes revelan mejoras en los tiempos de depuración, mayor comprensión de la lógica de los algoritmos y una experiencia de usuario valorada positivamente. La interfaz busca ser intuitiva, por lo que se busca desarrollar las sugerencias para focalizar la atención en los aspectos funcionales del código, reduciendo errores comunes.

El equipo considera que se están *superando las expectativas en innovación, prototipado y difusión temprana*, pero *requiere un mayor énfasis en seguridad y validación de impacto para* alcanzar los estándares propuestos. Como proyección, para la etapa final el reto principal será cerrar la brecha entre prototipos y plataforma estable, priorizando:

- Integración de protocolos de seguridad y privacidad.
- Avanzar en la integración robusta de hardware RA y su vinculación con entornos de programación.
- Fortalecer el entorno de pruebas y validaciones de impacto con estudiantes y docentes.
- La consolidación de informes de impacto con datos sólidos de estudiantes y docentes.
- Preparación de publicaciones científicas indexadas que documenten hallazgos y validaciones.

Además, será necesario abordar los siguientes desafíos:

- *La seguridad de datos* actualmente avanza más lentamente, en parte porque depende de la consolidación de una arquitectura estable.
- *La evaluación de impacto* requiere mayor maduración, pues la recolección de datos de usuarios finales aún está en curso.
- *La interfaz inmersiva* necesita ajustes de usabilidad para garantizar accesibilidad plena en diversos contextos.

Este proyecto aporta evidencia preliminar sobre la viabilidad de soluciones inmersivas en ingeniería de software, validando tecnologías clave y ofreciendo prototipos iniciales que mejoran la experiencia de programación. Los resultados preliminares confirman el potencial transformador de la plataforma, abriendo nuevas líneas de investigación y escalabilidad hacia contextos industriales. Se proyecta extender su aplicación a otros niveles formativos y/o entornos empresariales, con los ajustes pertinentes. Vislumbrando a futuro, se puede facilitar la capacitación de empleados mediante simulaciones interactivas y tutoriales guiados, mejorando la retención del conocimiento y la efectividad del aprendizaje.

Este tipo de proyectos pretende estimular la actitud crítica, la capacidad de resolver problemas, la creatividad y el trabajo colaborativo entre estudiantes y docentes, constituyéndose en elementos fundamentales de las denominadas habilidades del siglo XXI.

## 5. REFERENCIAS

Al-Ansi, A. M., Jaboob, M., Garad, A., & Al-Ansi, A. (2023). Analyzing the recent developments in augmented reality (AR) and virtual reality (VR) recent development in education. *Society and Business Review*, 8(2), 100532. https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2023.100532

Bers, M. U. (2024, 31 de agosto). *La programación es la alfabetización del siglo XXI*. Infobae. https://www.infobae.com/educacion/2024/09/01/marina-umaschi-bers-la-programacion-es-la-alfabetizacion-del-siglo-xxi/

Bers, M. U. (2022). *Beyond coding: The power of computational thinking in the classroom*. Cambridge, MA: MIT Press.

Bostrom, N. (2014). *Superintelligence: Paths, dangers, strategies*. Oxford University Press.

Bower, M., Howe, C., McCredie, N., Robinson, A., & Grover, D. (2014). Augmented Reality in education – cases, places and potentials. *Educational Media International, 51*(1), 1–15. https://doi.org/10.1080/09523987.2014.889400

Castells, M. (2000). La era de la información: Economía, sociedad y cultura. Vol. 1: La sociedad red. Siglo XXI.

Chukwunweike, J., & Aro, O. E. (2024). Implementing agile management practices in the era of digital transformation. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, *24*(1), 2223-2242.

Drucker, P. F. (1993). Post-capitalist society. Harper Business.

Koutromanos, G., & Kazakou, G. (2023). Augmented reality smart glasses use and acceptance: A literature review. *Computers & Education: X Reality, 2*, 100028. https://doi.org/10.1016/j.cexr.2023.100028

Papert, S. (1980). *Mindstorms: Children, computers, and powerful ideas*. New York, NY: Basic Books.

Topol, E. (2019). *Deep medicine: How artificial intelligence can make healthcare human again*. Basic Books.

Universidad de la Cuenca del Plata (UCP) (2024). Proyecto de Investigación "*Explorando Conexiones a través de la Realidad Aumentada potenciada por Inteligencia Artificial en los entornos de programación y desarrollo de software"*. Sede Corrientes. Disp. 379/24. 24/06/2024.

# LA CADENA DE SUMINISTRO DE LA ENERGÍA EN LOS BARRIOS POPULARES: APORTES DESDE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL PARA EL ANÁLISIS DEL ACCESO AL SERVICIO BÁSICO

Melian, Jose Isaac
*Facultad de Ingeniería , Universidad Nacional de Mar del Plata.*
*imelian@fi.mdp.edu.ar / joseisaacmelian@gmail.com*

**RESUMEN**

El artículo examina el acceso y el uso de la energía eléctrica en barrios populares de la ciudad de Mar del Plata que carecen de gas por red y han sido objeto de intervenciones públicas recientes. El estudio se enmarca en un enfoque socio técnico y combina herramientas de la ingeniería industrial y de la logística con perspectivas de los estudios urbanos y de la economía popular. La estrategia metodológica integra un análisis cuantitativo de registros bimestrales provistos por la distribuidora local con evidencia cualitativa situada recuperada de trabajo de campo y de una investigación doctoral previa. Esta triangulación permite interpretar con mayor precisión las configuraciones de acceso formal e informal y sus efectos sobre la operación del sistema eléctrico.

Los resultados muestran la existencia de una estacionalidad definida que se manifiesta con claridad cuando se depuran los registros que evidencian acceso irregular. En los meses fríos se verifica un incremento de la demanda asociado a la sustitución eléctrica de usos energéticos básicos y a condiciones habitacionales con pérdidas térmicas. Se observa además que la Tarifa de Interés Social funciona como un amortiguador que limita la facturación sin reducir necesariamente el consumo efectivo, lo cual obliga a distinguir entre demanda física y energía cobrada al planificar la red. La presencia de consumos nulos se interpreta como síntoma de acceso no medido y pone de relieve tensiones entre sostenibilidad económica, seguridad eléctrica y derecho al servicio.

Desde la perspectiva de la cadena de suministro, el artículo propone lineamientos para el pronóstico estacional, la gestión de capacidades y materiales, la organización de cuadrillas y la priorización territorial de acciones de regularización con enfoque no punitivo. El trabajo aporta evidencia empírica y un marco analítico para orientar decisiones operativas y de política pública que equilibren continuidad, seguridad y equidad en contextos de alta vulnerabilidad.

**Palabras Claves:** CADENA DE SUMINISTRO, ENERGÍA, BARRIOS POPULARES

**ABSTRACT**

This article examines access to and use of electricity in low-income neighborhoods in the city of Mar del Plata that lack piped natural gas and have recently been subject to public interventions. The study adopts a socio-technical perspective that brings together tools from industrial engineering and logistics with insights from urban studies and the solidarity economy. The methodological strategy integrates a quantitative analysis of bimonthly consumption records provided by the local distribution company with situated qualitative evidence drawn from fieldwork and prior doctoral research. This triangulation enables a more precise interpretation of configurations of formal and informal access and their effects on the operation of the electrical system.

The findings show a pronounced seasonal pattern that becomes visible when records indicating irregular access are filtered out. During the colder months, demand rises as electricity substitutes for basic energy uses and as housing conditions with poor thermal performance intensify reliance on electric heating and hot water. The study also observes that the Social Interest Tariff operates as a protective mechanism that limits billed amounts without necessarily reducing effective consumption, which underscores the need to distinguish between physical demand and billed energy when planning network capacity. Instances of zero recorded use are interpreted as symptoms of unmetered access, revealing tensions between economic sustainability, electrical safety, and the right to essential services.

From a supply-chain perspective, the article proposes guidelines for seasonal forecasting, capacity and materials management, crew organization, and territorial prioritization of regularization actions with a non-punitive approach. The contribution combines empirical evidence with an analytical framework to

inform operational decisions and public policy aimed at balancing continuity, safety, and equity in contexts of high vulnerability.

**Keywords:** SUPPLY CHAIN, ENERGY, INFORMAL SETTLEMENTS

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El acceso a los servicios básicos constituye un aspecto central en los debates contemporáneos sobre desigualdad urbana, desarrollo social y políticas públicas en América Latina. Dentro de ellos, la energía eléctrica ocupa un lugar prioritario, no solo porque posibilita la vida cotidiana —la iluminación, la cocción de alimentos, la calefacción, el funcionamiento de electrodomésticos y equipos médicos domiciliarios— sino también porque es condición indispensable para el ejercicio de otros derechos como la educación, la salud, la seguridad y la comunicación. Su provisión, por lo tanto, no puede analizarse únicamente desde una perspectiva técnica o económica, sino que se trata de un problema multidimensional que involucra tensiones entre lógicas de mercado, políticas estatales y demandas sociales.

En América Latina, la urbanización acelerada y fragmentada generó profundas desigualdades en el acceso a infraestructura y servicios urbanos. Según ONU-Hábitat (2012), cerca del 23,5% de la población urbana de la región habita en asentamientos informales, cifra que equivale a más de 111 millones de personas. Estos barrios, que crecen a un ritmo de seis millones de nuevos habitantes por año, se caracterizan por la precariedad habitacional, la ausencia de planificación y la falta de integración a las redes formales de provisión de servicios. En este contexto, la energía eléctrica se convierte en un recurso disputado: por un lado, las empresas distribuidoras deben lidiar con altos niveles de pérdidas no técnicas, mientras que, por otro, los hogares encuentran en la informalidad la vía posible de acceso a un recurso vital.

En Argentina, la problemática adquiere particular relevancia a partir de la sanción de la Ley 27.453 de Integración Socio Urbana (2018), que dio origen al Registro Nacional de Barrios Populares (RENABAP). Este registro identificó 6.467 barrios populares donde habitan más de 5,5 millones de personas, lo que equivale a casi el 12% de la población total del país. De acuerdo con el relevamiento realizado por RENABAP en 2023, en más del 60% de los hogares de estos barrios el acceso a la electricidad se da de manera informal, es decir, mediante conexiones irregulares, enganches directos o tableros comunitarios. Esta situación genera una doble vulnerabilidad: por un lado, riesgos de seguridad eléctrica —incendios, electrocuciones, sobrecarga de redes precarias— y, por otro, la exclusión del marco legal que reconoce a los usuarios como sujetos con derechos frente a la prestación del servicio.

La falta de acceso seguro a la electricidad en los barrios populares no puede desligarse de un aspecto crucial: la ausencia de gas por red. En el 98,9% de estos asentamientos, las familias dependen de la electricidad, leña o gas en garrafa no solo para la iluminación o los electrodomésticos básicos, sino también para usos energéticamente intensivos como la calefacción en invierno, la cocción de alimentos y el bombeo de agua. El incremento del costo de acceso a la leña, ha provocado un uso forzado de electricidad que multiplica la demanda en redes que ya se encuentran sobrecargadas, aumentando los cortes, las fluctuaciones de tensión y la conflictividad entre vecinos, empresas y Estado. En muchos casos, la falta de planificación energética refuerza un círculo vicioso: las familias pagan precios altos por un servicio deficiente (cuando logran acceder a la facturación formal) o quedan en la ilegalidad, dependiendo de conexiones informales que les permiten cubrir sus necesidades básicas a costa de la seguridad y la estabilidad del sistema.

Históricamente, la política energética argentina se estructuró en torno a modelos de provisión que oscilaron entre la centralización estatal y la privatización orientada al mercado. A partir de la reforma del sector eléctrico en la década de 1990, se instauró el modelo de gestión que se mantiene en la actualidad. Este modelo creado en base al modelo británico se ha basado en la mercantilización del servicio, donde la eficiencia económica y la recuperación de costos ocuparon un lugar prioritario frente a los objetivos de universalización. Este proceso incluyó la desintegración vertical del sistema en tres subsistemas marcados: generación, transporte y distribución; y la posterior privatización de empresas estatales como SEGBA en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) y ESEBA en la provincia de Buenos Aires, lo que reconfiguró las dinámicas de acceso a la energía en sectores populares.

El caso de Mar del Plata ilustra de manera paradigmática estas tensiones. A comienzos de la década de 1990, la empresa estatal ESEBA implementó un plan de regularización destinado a reducir las pérdidas no técnicas, que incluían tanto a usuarios solventes que cometían fraude como a familias

insolventes que se conectaban de manera informal por necesidad. La estrategia incluyó medidas tecnológicas (instalación de limitadores de consumo, interruptores termomagnéticos), normativas (Ordenanza Municipal 8557/92, que permitió la conexión de viviendas sin escritura mediante la sola presentación del DNI) y sociales (creación de la llamada “ruta 6000” para diferenciar a los usuarios de barrios populares de los usuarios solventes fraudulentos). Esta última innovación fue clave, ya que permitió reducir la conflictividad y consolidar a los sectores populares como un actor social relevante en la definición de políticas tarifarias diferenciadas.

La experiencia de Mar del Plata alcanzó un punto de inflexión con la instauración de la Tarifa de Interés Social (TIS) en el año 2000, resultado de la presión ejercida por el Sindicato de Luz y Fuerza local, la Federación de Trabajadores de la Energía de la República Argentina (FETERA) y la Central de Trabajadores Argentinos (CTA). La TIS no solo representó un alivio económico para miles de familias de bajos ingresos, sino que además configuró un precedente histórico en la discusión sobre el derecho a la energía. Si bien la implementación posterior de la tarifa social nacional en 2015 incorporó un criterio estatal más explícito en la definición de beneficiarios, lo cierto es que gran parte de los mecanismos de acceso diferencial en barrios populares se habían desarrollado previamente a partir de la negociación entre empresas, sindicatos y organizaciones sociales.

Los datos aportados por el RENABAP en 2018 y los estudios académicos más recientes muestran que, pese a estos avances, la situación de los barrios populares continúa siendo crítica. En un 61,2% de los asentamientos, la mayoría de los hogares accede a la electricidad de manera irregular, y en muchos casos esa informalidad convive con facturación parcial, cortes selectivos y conflictos con las empresas distribuidoras. Esto pone en evidencia la persistencia de un modelo híbrido de acceso, donde la energía se encuentra parcialmente desmercantilizada: no se paga el total de lo consumido, pero tampoco se reconoce plenamente como un derecho universal garantizado por el Estado.

En este sentido, el análisis del acceso a la electricidad en barrios populares no puede reducirse a una discusión técnica sobre pérdidas y eficiencia, aunque también es necesario. ni a una mera descripción de la conflictividad social. Se trata, más bien, de comprender la interacción entre dinámicas socio-políticas y dinámicas técnico-organizacionales, donde los intentos empresariales de disciplinar el consumo mediante tecnologías de control (limitadores, cables antihurto, medidores prepagos) se enfrentan a estrategias comunitarias de resistencia y negociación que, en última instancia, moldean el funcionamiento del sistema energético para este segmento de usuarios.

Desde el punto de vista disciplinar, la ingeniería industrial y la logística aportan herramientas valiosas para abordar estos problemas complejos. La gestión de la cadena de suministro, por ejemplo, permite pensar la distribución de energía en términos análogos a los flujos de mercancías, destacando la importancia de planificar, coordinar y optimizar recursos escasos en contextos de restricción. La simulación de procesos, por su parte, ofrece un marco metodológico para experimentar con diferentes escenarios de política pública, evaluando de manera controlada los efectos de cambios tarifarios, obras de infraestructura o estrategias de regularización.

El presente trabajo se propone articular estas perspectivas, analizando la experiencia de acceso a la electricidad en barrios populares de Mar del Plata y explorando cómo las herramientas de la ingeniería industrial pueden contribuir a diseñar políticas más inclusivas y sostenibles. A partir de datos provistos por la Empresa Distribuidora de Energía Atlántica (EDEA) sobre consumos en los barrios Caribe y Villa Evita —dos asentamientos sin acceso a gas por red, intervenidos por la Secretaría de Integración Socio-Urbana a través de los Proyectos de Obras Tempranas (POT)— se busca examinar empíricamente las dinámicas de consumo, las interrupciones en el acceso y las implicancias de la informalidad energética.

De esta manera, se pretende ofrecer un aporte original al debate sobre energía y desigualdad, conectando tres dimensiones analíticas: (i) la conflictividad social como motor de cambio, (ii) la gestión logística como disciplina orientada a la eficiencia y la planificación de recursos, y (iii) la simulación como metodología para explorar alternativas de política pública. En un escenario global en el que la energía se reconoce cada vez más como un derecho humano, resulta indispensable avanzar en investigaciones que no solo describan los problemas, sino que también ensayen soluciones concretas y aplicables.

### 1.2 METODOLOGÍA

La investigación adopta un enfoque situado, crítico y participativo, coherente con la estrategia metodológica desarrollada en la tesis doctoral (Melian, 2025). En este sentido se integran métodos cuantitativos y cualitativos, articula la praxis territorial con la reflexión académica y se orienta a producir conocimiento útil para la toma de decisiones públicas y sociales. Este enfoque reconoce que el acceso

a la energía en barrios populares es un proceso socio-técnico, en el que tecnologías, normativas y actores -Estado, empresa, organizaciones vecinales- co-configuran trayectorias de problema-solución.

Se analizan dos barrios populares del Partido de General Pueyrredón: Caribe y Villa Evita. Ambos carecen de gas por red y fueron objeto de intervenciones a través de Proyectos de Obras Tempranas (POT) de la Secretaría de Integración Sociourbana (SISU). Este contexto es clave para interpretar la sustitución eléctrica de usos energéticos (calefacción, ACS, cocción) y las consecuencias sobre demanda, seguridad eléctrica y gobernabilidad del servicio.

Se utilizaron planillas provistas por la Empresa Distribuidora de Energía Atlántica (EDEA) con mediciones bimestrales para 12 bimestres consecutivos (dos años) de todos los usuarios de Caribe y Villa Evita, además del consolidado Caribe+VE. Cada registro incluye: barrio, ID de usuario, titular, tarifa y consumo (kWh) por bimestre. Las tipologías tarifarias observadas son:

T1G (comercial),

T1R (residencial),

T1RE (residencial estacional, específica de Gral. Pueyrredón),

TSO (tarifa social; origen nacional 2016, hoy provincial),

TIS (tarifa de interés social plana: se factura hasta 300 kWh/bimestre).

Se construyeron las siguientes variables analíticas:

1. Consumo bimestral (kWh) por usuario.
2. Promedio bimestral por usuario (media sobre 12 bimestres).
3. Estacionalidad: comparación enero–febrero vs julio–agosto (mapeo de bimestres 3/9 y 6/12), con dos cortes:
4. Serie formal depurada: excluye 0 kWh para captar el comportamiento de medidores activos.
5. Serie completa: incluye 0 kWh para reflejar el subregistro por acceso irregular.
6. Irregularidad: % de 0 kWh por barrio y por tarifa; persistencia (secuencias en 0) y recurrencia (probabilidad de caer a 0 tras picos).
7. Excedente TIS no facturable: sumatoria de (consumo − 300 kWh) en cada bimestre TIS, truncada inferiormente en 0.
8. Desagregados por barrio × tarifa (conteos y promedios).
9. Tendencia interanual: comparación de bimestres equivalentes.

Se triangulan los hallazgos cuantitativos con relatos y observaciones sobre retiro de medidores, enganches, tableros comunitarios y limitadores intervenidos. Esta triangulación permite interpretar los 0 kWh no como ausencia de uso, sino como consumo no medido en contextos de vulnerabilidad y conflictividad —coherente con la historia local de negociación y con la TIS como mecanismo de desmercantilización parcial.

Se trabajó con datos anonimizados provistos por la distribuidora; no se publican identificadores personales ni domicilios. El uso de la información tiene fines académicos y de mejora de políticas públicas, en consonancia con el enfoque no punitivo de regularización que promueve el trabajo.

El análisis es reproducible: el mapeo de bimestres, los umbrales TIS (300 kWh) y las reglas de depuración (exclusión/ inclusión de 0 kWh) se detallan explícitamente. Como extensión, la evidencia aquí sistematizada habilita la simulación de eventos discretos para evaluar escenarios de refuerzo de BT, estrategias de regularización no punitivas y sensibilidades de política tarifaria, manteniendo la lógica socio-técnica.

## 2. DESARROLLO

El análisis de los consumos de energía eléctrica en los barrios populares Caribe y Villa Evita, ambos pertenecientes al Partido de General Pueyrredón, permite iluminar de manera empírica la tensión entre el acceso formal e informal al servicio, la estacionalidad de la demanda, las prácticas comunitarias y las limitaciones de los marcos regulatorios vigentes. Los datos fueron provistos por la Empresa Distribuidora de Energía Atlántica (EDEA) y corresponden a registros bimensuales de los últimos dos años, lo que permite observar tendencias estacionales, variaciones interanuales y situaciones de pérdida de acceso formal al servicio. Estos barrios fueron, además, objeto de intervenciones por parte de la Secretaría de Integración Sociourbana (SISU) de la Nación Argentina a través de los Proyectos de Obras Tempranas (POT), que procuraron dotar de mejoras de infraestructura a territorios

históricamente relegados en el acceso a servicios básicos. La incorporación de estos datos a la investigación otorga robustez empírica a la reflexión, en tanto permite cruzar la evidencia cuantitativa con los marcos teóricos y contextuales desarrollados en la tesis doctoral de referencia.

El análisis de los consumos eléctricos en los barrios Caribe y Villa Evita, provistos por la Empresa Distribuidora de Energía Atlántica (EDEA), permite avanzar en la caracterización de los patrones de acceso a la energía en sectores populares del Partido de General Pueyrredón. Ambas comunidades carecen de acceso a gas natural por red, lo que obliga a los hogares a depender de la electricidad para calefacción, cocción y otros usos básicos. Esta condición convierte a la electricidad en un recurso aún más crítico, cuyo consumo refleja tanto necesidades energéticas como estrategias de subsistencia en contextos de precariedad.

Los datos abarcan dos años de registros bimestrales y permiten identificar patrones estacionales, tendencias interanuales y formas de acceso irregular. A continuación, se presentan los principales hallazgos y reflexiones.

### 2.1. Caracterización socio-urbana de Caribe y Villa Evita y detalle de la muestra.

Caribe y Villa Evita comparten la condición de asentamientos populares consolidados en Mar del Plata, con altos niveles de precariedad habitacional, informalidad laboral y ausencia de acceso a servicios básicos en condiciones regulares. Ninguno de los dos barrios cuenta con red de gas natural, lo cual convierte a la electricidad en el único recurso energético confiable para calefacción, cocción de alimentos y provisión de agua caliente. Esta situación los vuelve especialmente sensibles a la estacionalidad, dado que en una ciudad con inviernos prolongados y fríos como Mar del Plata, los consumos energéticos se disparan en los meses de junio a agosto.

El despliegue de los POT significó la ejecución de instalaciones electricas intradomiciliarias en todas las viviendas de ambos barrios y la instalación de los pilares homologados para el acceso formal a la red. A la par de esto, la empresa prestadora implementó mejoras en la red eléctrica de ambos barrios. Sin embargo, como muestran tanto las entrevistas recuperadas en la tesis como los datos de consumo, el acceso sigue siendo irregular, fragmentado y atravesado por una conflictividad persistente entre usuarios, empresa y Estado.

*Tabla 1. Población de análisis*

| **Usuarios totales (n): 386** | **Caribe: 141 (36.5%)** | **Villa Evita: 245 (63.5%)** |
|---|---|---|

*Tabla 2. Distribución por tipo de tarifa*

| **Tarifa** | **Usuarios** | **Porcentaje del total** |
|---|---|---|
| TIS (Tarifa de Interés Social) | 184 usuarios | 47.7% |
| TSO (Tarifa Social) | 110 | 28.5% |
| T1R (Residencial) | 64 | 16.6% |
| T1G (Comercial) | 3 | 0.8% |
| T1RE (Residencial Estacional – exclusiva de Gral. Pueyrredón) | 25 | 6.5% |

Casi la mitad de los suministros del consolidado se encuentran bajo TIS, señal de alta vulnerabilidad y/o acuerdos de regularización histórica.

### 2.2. Estacionalidad en los consumos eléctricos

En base a la evidencia empírica podríamos aportar que la estacionalidad constituye un rasgo estructural del consumo eléctrico en asentamientos sin red de gas natural. En estos contextos, la electricidad asume funciones energéticas intensivas (calefacción, agua caliente y, en ocasiones, cocción), por lo que los meses fríos presionan la demanda aun en viviendas de muy bajo ingreso. En el Barrio Caribe, al excluir registros de 0 kWh (que reflejan acceso irregular/no medido), el promedio bimestral por usuario se incrementa de ~407 kWh en enero–febrero a ~532 kWh en julio–agosto, lo que supone una diferencia estacional de +126 kWh (≈ +31%). El patrón es consistente con lo documentado cualitativamente en trabajos anteriores Melian (2025): viviendas con elevadas pérdidas térmicas y uso intensivo de calefactores eléctricos ante la ausencia de alternativas (garrafas costosas, falta de red de gas).

En el Barrio Villa Evita, con el mismo criterio de depuración (mediciones completas y >0 kWh), se observa también aumento invernal, aunque de magnitud moderada (en ejercicios previos: +150 kWh en promedio). La menor amplitud relativa puede interpretarse como resultado de mejoras constructivas, el barrio tiene más de 30 años de antiguedad mientras que Caribe tiene menos de 10 años. Al consolidar Caribe + Villa Evita, el diferencial estacional permanece positivo; no obstante, su magnitud se ve parcialmente atenuada en el consolidado cuando se impone el filtro estricto de completitud, porque se excluyen muchos casos que caen a 0 kWh en invierno por retiro de medidor o interrupción del acceso regular lo cual aplasta artificialmente el pico invernal en la serie formal.

Metodológicamente, es crucial presentar dos cortes: (i) la serie “formal depurada” (sin 0 kWh), que captura el comportamiento de los medidores activos y exhibe el pico invernal; y (ii) la serie completa, donde la irregularidad (0 kWh) subestima la máxima invernal al reducir la base de casos activos en los bimestres críticos. Esta doble lectura es consistente con la literatura sobre pobreza energética: el problema no es la “ausencia de demanda”, sino la fragilidad del vínculo formal al servicio. En suma, la estacionalidad existe, es significativa en Caribe y apreciable en Villa Evita; y su magnitud real solo emerge con nitidez cuando se controla por la irregularidad.

Este análisis podría ser deinterés para la aplicación de políticas energéticas en ciudades frías como Mar del Plata, la política tarifaria y la planificación de red deberían ponderar explícitamente el invierno como período de máxima vulnerabilidad, sobre todo en barrios sin gas, donde la electricidad no es un complementario sino un sustituto energético.

El consumo promedio bimestral consolidado (Caribe + Villa Evita) muestra un leve aumento entre 2022 con 479 kWh por vivienda y 2023 con 497 kWh por vivienda. Dentro de una perspectiva ampliada, los patrones de aumento del consumo eléctrico que se verifican en Caribe y Villa Evita con el incremento interanual aproximado del 4 % entre 2022-2023 se explican por una tendencia global y nacional de crecimiento sostenido de la demanda energética. A nivel mundial, estudios como los de Ember muestran que desde el año 2000 la demanda eléctrica casi se ha duplicado, pasando de aproximadamente 15.000 TWh a cerca de 28.500 TWh en 2022, impulsada por la creciente urbanización, mayor acceso a aparatos eléctricos, electrificación de servicios y aumento de la población. En Argentina, los informes de CAMMESA sobre demanda histórica del Mercado Eléctrico Mayorista confirman que las variables físicas del mercado, entre ellas el consumo residencial, han tenido incrementos consistentes en las últimas décadas, aunque a ritmos que varían según tarifas, subsidios y capacidad de red. Este escenario nacional y global aporta un marco comparativo útil: lo que los datos locales podría parecer un cambio modesto, se vuelve significativo cuando se entiende que cada hogar que consume más electricidad para calefacción o cocina (por falta de gas) constituye una contribución acumulativa a esa tendencia global. Además, revela el doble desafío: por un lado, gestionar la cadena de suministro local para responder al aumento de la demanda; por otro, hacerlo sin agravar las desigualdades que ya están presentes en los barrios populares.

### 2.3 Energía no facturada por la empresa (excedentes en TIS)

Desde el año 2000, la Tarifa de Interés Social (TIS) opera como un amortiguador social que limita la factura a 300 kWh/bimestre, aun cuando el consumo real superé dicho umbral. Sobre la base consolidada de análisis, la energía entregada bajo TIS asciende a ~756.294 kWh en los bimestres observados, de los cuales ~397.933 kWh constituyen excedente no facturable, es decir, ~52,62% del total TIS no se cobra. En términos de frecuencia, 1 de cada 2 mediciones TIS (50,3%) supera los 300 kWh, confirmando que la tarifa no más allá de intentar reducir el uso, protege a los hogares del traslado pleno de ese uso a la factura.

En clave social, podríamos afirmar que la TIS permite sostener el acceso en picos invernales y evita que el costo energético desplace el gasto alimentario o sanitario. Segundo, en clave financiera, la TIS internaliza en la distribuidora una porción sustantiva de energía entregada no cobrada, que convive con pérdidas no técnicas. Para una lectura fina por territorio, la proporción de bimestres TIS >300 kWh resulta levemente mayor en Villa Evita (52,4%) que en Caribe (47,9%), coherente con sus promedios bimestrales más altos y/o con mayor regularidad de medición. La TIS, como mecanismo de desmercantilización parcial, confirma lo relatado históricamente para Mar del Plata en Melian (2025): acuerdos y arreglos, primero informales, luego regulados, constituyeron un régimen singular de acceso diferencial, anclado en la conflictividad y en la negociación intersectorial. Desde la ingeniería, este dato es clave para la gestión de la demanda: el sistema debe dimensionarse para el consumo real, no el facturable, porque el flujo eléctrico ocurre igual. Por lo tanto, planificar con base en la demanda cobrada subestima el requerimiento de red y eleva el riesgo operativo por sobrecargas, fallas, reposiciones, etc.

En términos de magnitud individual, el excedente estimado equivale a ~1.081 kWh/año por usuario TIS promedio, que es energía que circula por la red y no genera ingreso. La coexistencia de excedentes TIS y acceso irregular describe un equilibrio inestable: si la empresa endurece controles, puede empujar parte del consumo hacia la irregularidad; si tolera excedentes, internaliza pérdidas económicas. El desafío regulatorio, entonces, no es eliminar la protección, sino diseñar esquemas que acompañen la vulnerabilidad sin generar incentivos perversos ni riesgos técnicos.

### 2.4. Acceso irregular: detección a través de casos 0 kWh

Un aspecto clave de la base de datos es la presencia recurrente de registros con 0 kWh de consumo. En un análisis superficial, estos casos podrían interpretarse como ahorro energético o viviendas vacías. Sin embargo, el trabajo de campo y la literatura sobre asentamientos populares (Pirez, 2009; Cacopardo, 2023) indican que, en realidad, se trata de consumo no medido: familias que acceden a la electricidad mediante “ganchos” o conexiones informales a la red.

Los valores de 0 kWh en registros bimestrales no configuran ahorro ni vivienda vacía como hipótesis general; en barrios populares, la evidencia cualitativa y los antecedentes históricos del caso marplatense indican que esos 0 equivalen a consumo no medido (conexiones informales, medidores retirados, tableros comunitarios). En el consolidado, 9,5% de todos los registros válidos corresponden

a 0 kWh; 32,1% de los usuarios tiene al menos un bimestre en 0, y 43 usuarios presentan todos sus bimestres en 0. La irregularidad es más alta en Caribe (11,57%) que en Villa Evita (8,38%), y por tarifa se concentra en TIS (13,54%), lo que sugiere mayor fragilidad del vínculo formal en los segmentos de mayor vulnerabilidad.

Dos efectos metodológicos emergen de esta constatación. Primero, la irregularidad subestima los promedios formales: una serie con muchos 0 kWh "barre" hacia abajo el consumo bimestral medio y enmascara la estacionalidad invernal. Segundo, al excluir los 0 kWh para medir estacionalidad (como hicimos en Caribe y Villa Evita), la diferencia invierno–verano se vuelve nítida (Caribe: +126 kWh; Villa Evita: ~+150 kWh en ejercicios previos), lo que confirma que la demanda real es mayor a la registrada en invierno. En términos de política pública, negar la irregularidad como fenómeno técnico-social produce errores de dimensionamiento y malas lecturas de la pobreza energética: no se trata de "no querer pagar" o "no usar", sino de no poder acceder a un régimen formal sostenible.

Como métrica operativa, proponemos incorporar a los tableros de la distribuidora tres indicadores simples: (i) % de 0 kWh por barrio y por tarifa; (ii) persistencia de 0 en usuarios (número de bimestres consecutivos en 0); y (iii) recurrencia (probabilidad de caer a 0 tras un pico alto). Estas métricas, cruzadas con cuadrillas/actuaciones en territorio, ayudarían a priorizar regularización y prevenir fallas por sobrecarga. Desde la perspectiva académica, esta evidencia refuerza la lectura socio-técnica del servicio: los 0 kWh son un síntoma de exclusión, no una variable a eliminar del análisis.

Esto revela un patrón de acceso irregular que convive con los registros formales. La electricidad está presente en la vida cotidiana de los hogares, pero no necesariamente bajo un esquema regulado. Desde la perspectiva de la cadena de suministro (Chopra & Meindl, 2023), se trata de "pérdidas no técnicas": energía que circula en el sistema pero que no es facturada ni controlada. Este fenómeno no solo erosiona la sostenibilidad económica de las distribuidoras, sino que también expone a los usuarios a condiciones inseguras y precarias. La comparación entre los casos de acceso regular e irregular refuerza la hipótesis de que la cuestión no es la falta de consumo, sino la falta de integración plena a la red formal. La pobreza energética aquí se expresa menos en la "ausencia de energía" que en la fragilidad del acceso.

### 2.4 Impactos sobre la cadena de suministro eléctrica: pronóstico de la demanda y gestión de recursos

El Estado, a través de programas como los Proyectos de Obras Tempranas (POT) de la Secretaría de Integración Socio-Urbana, ha intervenido en estas comunidades para mejorar las condiciones de acceso. Sin embargo, los datos muestran que la situación sigue siendo frágil: los POT aportan infraestructura, pero la sostenibilidad del acceso depende de políticas tarifarias inclusivas y de mecanismos de regularización que contemplen la capacidad de pago real de los hogares.

Mirado como cadena de suministro, el sistema de distribución eléctrica en barrios populares enfrenta problemas homólogos a los de un SCM: picos de demanda (invierno), pérdidas técnicas y no técnicas (sobrecargas e irregularidad), restricciones de capacidad (transformadores, líneas de BT/MT) y riesgo operativo (cortes, incendios, tensión social). El sistema eléctrico enfrenta los mismos desafíos que una cadena de distribución de bienes: debe pronosticar la demanda, asegurar inventarios suficientes, optimizar recursos humanos y materiales, y responder ante contingencias. Sin embargo, a diferencia de un sistema mercantil tradicional, en este caso la demanda está atravesada por la vulnerabilidad socioeconómica de los usuarios, lo cual introduce un componente de incertidumbre adicional. Los cortes masivos por sobrecarga o las desconexiones de usuarios irregulares pueden desencadenar protestas, bloqueos y reclamos políticos, lo que obliga a la empresa a gestionar la cadena de suministro no solo desde la eficiencia técnica, sino también desde la gobernabilidad social.

En este marco, la pregunta de gestión no es solo "cuánta energía se cobra", sino cuánta energía se debe entregar para sostener el servicio en condiciones de equidad y seguridad. Así como una empresa enfrenta cuellos de botella, pérdidas y desajustes en sus flujos logísticos, el sistema eléctrico en barrios populares enfrenta:

- Pérdidas técnicas: producto de redes sobrecargadas o deterioradas.
- Pérdidas no técnicas: derivadas de enganches, otros hurtos y consumos no medidos.
- Desbalances de demanda: estacionalidad invernal que presiona el sistema.
- Riesgos operativos: incendios, cortes o electrocuciones por conexiones informales.

Con la evidencia disponible, pueden definirse reglas de pronóstico pragmáticas y accionables:

- Estacionalidad base: en barrios sin gas, prever incrementos de +25%–35% en julio–agosto respecto de enero–febrero (Caribe: +31%; Villa Evita: +~25–30%).
- Ajuste por irregularidad: el % de 0 kWh por barrio subestima la demanda real; incorporar un factor de corrección (por ejemplo, sumar X kWh por cada 0 en invierno según perfiles históricos de hogares similares).
- Excedente TIS como demanda técnica: el excedente >300 kWh en TIS no se cobra, pero sí fluye; debe sumarse al pronóstico físico (no al financiero) para dimensionar capacidad.
- Inventario y cuadrillas: picos invernales demandan stock de fusibles, transformadores, aisladores, cableado de BT y material de acometidas, además de cuadrillas en turnos y protocolos de priorización territorial (barrios con mayor % de 0 kWh y mayor excedente TIS).

Desde una perspectiva logística, conviene ensayar un plan maestro invernal por barrio que combine: (a) refuerzos de capacidad en BT (sectores con mayor recurrencia de picos y 0 kWh); (b) campañas de regularización “no punitivas” coordinadas con POT y referentes comunitarios (para disminuir 0 kWh sin empujar a la clandestinidad); (c) ventanas de mantenimiento priorizadas (antes del pico estacional).

## 3. Reflexiones provisorias.

Los resultados presentados permiten esbozar varias reflexiones de carácter crítico:

**Con respecto a la metodología que provee la ingeniería industrial:**

La información bimensual permite ensayar un pronóstico básico de la demanda, identificando patrones estacionales que se repiten año a año. Si se toma como referencia el consolidado de ambos barrios, se observa que los picos de consumo se concentran sistemáticamente en julio-agosto, con incrementos promedio superiores al 20% respecto de los meses de verano. Este dato es crucial para la planificación de la empresa, que debe anticipar estos picos con suficiente capacidad de red, cuadrillas y materiales.

Sin embargo, el pronóstico enfrenta limitaciones: la presencia de accesos irregulares hace que el consumo real sea mayor al registrado, lo que introduce un sesgo difícil de cuantificar. Además, las intervenciones del Estado (como los POT o la implementación de subsidios) pueden modificar abruptamente la demanda al facilitar el acceso regular de nuevos usuarios. Por ello, más que modelos de predicción lineales, se requieren enfoques dinámicos que combinen proyecciones técnicas con lecturas sociales y territoriales, articulando la planificación logística con la conflictividad política.

Finalmente, aunque la simulación no sea el eje de este paper, el modelo conceptual está claro: nodos (transformadores, pilares, tableros comunitarios), recursos (cuadrillas, materiales), procesos (conexión, medición, corte/reconexión), estacionalidad y políticas tarifarias (TIS/TSO). Un modelo de eventos discretos permitiría evaluar escenarios: reforzar TIS invernal, cambiar umbrales, priorizar inversiones de BT, o diseñar rutas de regularización que minimicen conflictos y pérdidas. En términos de supply chain, se trata de balancear servicio (continuidad/seguridad) con costo (pérdidas técnicas/no técnicas) y gobernabilidad (conflictividad y legitimidad).

**Con respecto a la cuestión estructural de la energía en los barrios populares:**

La electricidad como sustituto del gas natural: en ausencia de red de gas, la electricidad asume un rol central en la vida cotidiana, lo que multiplica la vulnerabilidad de los hogares frente a la estacionalidad. La desigualdad energética se expresa no solo en los precios, sino también en la imposibilidad de diversificar fuentes de energía.

El acceso irregular como estrategia de supervivencia: lejos de ser un residuo del sistema, el acceso informal constituye un componente estructural del mismo. Los “0 kWh” son la evidencia estadística de esta paradoja: usuarios que consumen pero no figuran en la contabilidad formal. Desde una perspectiva crítica, esto cuestiona la idea de universalización del servicio bajo un esquema mercantil. La cadena de suministro bajo tensión social: la logística eléctrica en barrios populares no se limita a cálculos de eficiencia técnica, sino que debe considerar la gobernabilidad. Cada decisión logística (corte, reparación, ampliación) puede tener consecuencias sociales y políticas de alto impacto.

El desafío del pronóstico en contextos de desigualdad: los modelos clásicos de predicción de demanda resultan insuficientes cuando una parte significativa de los consumos es irregular o subregistrada. Esto obliga a repensar metodologías que integren variables socioeconómicas y comunitarias. La relevancia de los POT como intervenciones parciales: si bien las Obras Tempranas han permitido cierta mejora en la infraestructura, los resultados muestran que no logran revertir la estructura desigual del acceso. El consumo sigue marcado por la estacionalidad y por la exclusión formal de numerosos hogares.

## 4. REFERENCIAS.


Bourdieu, P. (1997). Razones prácticas. Sobre la teoría de la acción. Anagrama.

Bouzarovski, S., & Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. Energy Research & Social Science, 10, 31–40. https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.06.007

Dagnino, R. (2010). Tecnología social: herramienta para construir otra sociedad (2.ª ed.). Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva.

Kelton, W. D., Sadowski, R. P., & Sturrock, D. T. (2009). Simulation with Arena (5th ed.). McGraw-Hill.

Law, A. M. (2019). Simulation Modeling and Analysis (5th ed.). McGraw-Hill.

Melian, J. I. (2025). El acceso a la energía eléctrica de los barrios populares: análisis a partir de una perspectiva sociotécnica. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Quilmes]. Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto (RIDAA).

ONU-Hábitat. (2012). Streets as tools for urban transformation in slums: A street-led approach to citywide slum upgrading. UN-Habitat.

Pírez, P. (2009). Las sombras de la luz: Distribución eléctrica, configuración urbana y pobreza en la región metropolitana de Buenos Aires. Eudeba.

Pírez, P. (2018). Analizar la urbanización latinoamericana a partir de la heterogeneidad de modalidades de producción y consumo. Risco – Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo, 16(3), 45–62. https://doi.org/10.11606/issn.1984-4506.v16i3p45-62

Registro Nacional de Barrios Populares (RENABAP). (2018). Registro Nacional de Barrios Populares. Ministerio de Desarrollo Territorial y Hábitat, Presidencia de la Nación. https://www.argentina.gob.ar/habitat/renabap

Registro Nacional de Barrios Populares (RENABAP). (2023). Observatorio de Barrios Populares. Ministerio de Economía, Presidencia de la Nación. https://datos.gob.ar/dataset/desarrollo-social-registro-nacional-barrios-populares

Provincia de Buenos Aires. (2000, 2 de junio). Decreto 1522/2000: Acceso al servicio eléctrico para usuarios de escasos recursos. Boletín Oficial de la Provincia de Buenos Aires.

Provincia de Buenos Aires. (2001, 10 de mayo). Ley 12.698: Tarifa Eléctrica de Interés Social (TIS). Boletín Oficial de la Provincia de Buenos Aires. https://normas.gba.gob.ar/documentos/0nve3IM0.html

Congreso de la Nación Argentina. (2018, 29 de octubre). Ley 27.453: Régimen de Regularización Dominial para la Integración Socio Urbana. Boletín Oficial de la República Argentina.



**Agradecimientos**

El autor de este trabajo desea agradecer a Empresa Distribuidora de Energía Atlántica SA; Secretaría de Integración Sociourbana de la Nación; Organismo de Control de Energía Eléctrica de la Provincia

de Buenos Aires; Fundación Yo soy porque nosotros somos; Asociación Civil la Trinchera Cultural Mar del Plata; Centro de Estudios para la Integración Sociourbana.

# Plan para la Implementación de un Sistema de Mantenimiento Productivo Total (TPM) para equipos de tratamiento de áridos en empresa constructora

Molina, Lucas Emanuel; Bonavetti; Viel, Jorge; Nicolás, Ariel

*Departamento de Ciencias y Tecnologías Aplicadas*
*a la Producción, al Ambiente y al Urbanismo, Universidad Nacional de La Rioja.*
*Av. Luis M. de la Fuente s/n La Rioja CP 5300. ingenieriaindustrial@unlar.edu.ar,*
*lucasemolina14@gmail.com, jbonavetti@unlar.edu.ar,*

**RESUMEN**

En este trabajo se presenta un plan de implementación de un sistema TPM para equipos de tratamiento de áridos en una empresa constructora, esto con el objetivo de fortalecer la estructura de gestión de la empresa y mejorar la eficiencia operativa de los equipos mencionados. Mediante la aplicación de herramientas como FODA, 5S, Análisis Causa – Efecto, entre otras se pretende implementar de la manera más eficiente los pilares de TPM, partiendo de un diagnóstico de la situación actual de la empresa.

Con el presente trabajo, basado en estudios y principios de la ingeniería industrial y las buenas prácticas empresariales analizando factores internos como externos, buscamos alcanzar de forma objetiva y tangible y medible la mejora continua y el éxito en el mercado como empresa de tratamiento de áridos.

**Palabras claves:** Planeamiento Implementación, TPM, Mejora.

**ABSTRAC**

This paper presents a TPM system implementation plan for aggregate processing equipment in a construction company. The goal is to strengthen the company's management structure and improve the operational efficiency of the equipment mentioned above. By applying tools such as SWOT, 5S, and Cause-Effect Analysis, among others, the plan aims to efficiently implement the pillars of TPM, starting with a diagnosis of the company's current situation.

With this paper, based on industrial engineering studies and principles and good business practices, analyzing internal and external factors, we seek to objectively, tangibly, and measurably achieve continuous improvement and market success as an aggregate processing company.

**Keywords:** Planning, Implementation, TPM, Improvement.

## 1. INTRODUCCION:

Construir SRL en una empresa constructora del norte argentino caracterizada por tener equipos de última tecnología para tratamiento de áridos, con los cuales se pueden obtener diversos materiales destinados a la elaboración de productos finales o para materia prima como, por ejemplo, áridos para elaboración de asfalto y/o hormigón, áridos para construcción, materiales granulares para fabricación de caminos. Debido a la envergadura de la empresa y por la capacidad productiva de sus equipos, la mejor manera de asegurar la mejor disponibilidad de este tipo de equipos es con la implementación y uso de un plan de mantenimiento integral, involucrando a todos y cada uno de los actores participes en el proceso.

Es importante se realice lo siguiente para la elaboración del trabajo mencionado:

- Descripción de la empresa, incluye análisis FODA de la organización y explicación de proceso productivo con los equipos a estudiar.
- Desarrollo del marco teórico, incluye definición de TPM y explicación de cada uno de sus pilares y de 5S como base de TPM.
- Diagnostico y situación actual, incluye estudio de disponibilidad de equipos, motivos de parada de máquinas y análisis de causas por los paros.
- Implementación de 5S, explicación del por qué es necesaria este sistema, beneficios y pasos para su implementación.
- Desarrollo para la implementación de cada uno de los pilares de TPM, fundamentación, objetivos, beneficios y planes para implementarlos.
- Estudio y propuesta de indicadores para medición y control del sistema TPM.
- Estudio de costos, incluye el análisis de costos por implementar 5S y cada uno de los pilares fundamentales con precios reales en USD + IVA.
- Impacto económico, esto para determinar la rentabilidad de implementar un sistema TPM.
- Desarrollo de conclusiones y recomendaciones.

## 2. INFORMACIÓN DE LA EMPRESA

- Nombre de la empresa: Construir SRL
- Misión de la empresa: Satisfacer a los clientes, quienes valoran la calidad del servicio, en forma directa o a uniones transitorias de empresas (UTEs), apoyándose en la amplia experiencia y participación de sus socios. **Construir SRL** concentra sus esfuerzos en la calidad, seguridad, innovación y medio ambiente, con un fuerte sentido de responsabilidad social, contando con una maquinaria moderna y un recurso humano motivado y capacitado, con fundamentos éticos y valóricos.
- Dirección: Ruta 1 Kilometro 8 – San Salvador de Jujuy – Provincia de Jujuy

## 3. ANÁLISIS DE LA EMPRESA

### 3.1 Descripción de la empresa.

Construir SRL es una empresa constructora de la provincia de Jujuy fundada en el año 2003. Actualmente posee 243 equipos, dentro de los cuales, 12 de esos son equipos específicos usados para el tratamiento de áridos (Trituración y cribado) únicos en el norte del país, lo cual la diferencia con respecto al resto de las constructoras del norte argentino.

Actualmente la empresa cuenta con una capacidad productiva de 5300 toneladas por hora de áridos. Este valor puede varias dependiendo del producto que se necesite procesar ejemplo:

- Material para asfalto.
- Balasto para vías de tren.
- Bases granulares para obras viales.
- Piedras para gaviones y colchonetas obras civiles.
- Arenas en diferentes granulometrías, trituradas, lavadas o comunes.
- Etc.

Todo esto es posible porque CONSTRUIR SRL cuenta actualmente con la siguiente flota de equipos Plantas de tratamientos de áridos:

- 1 Zaranda móvil Chieftain 2100X.
- 1 Zaranda móvil Chieftain 1400.
- 1 Zaranda móvil Chieftain 1700.
- 1 Zaranda móvil Chieftain M1700 lavadora.
- 1 Trituradora móvil Primaria Premier Track 600.
- 3 Trituradoras móviles Secundarias 1000SR con cajón de cribado.
- 1 Trituradora móvil Secundaria 1000 Maxtrack sin cajón cribado.
- 3 Zarandas móviles Warrior 1800.

### 3.2 Estructura organizacional para mantenimiento de equipos de equipos de áridos.

- 1 jefe de Mantenimiento
- 2 supervisores de Mantenimiento
- 1 mecánico especializado
- 1 mecánico medio oficial
- 1 electromecánico
- 2 soldadores
- 3 especialistas en plantas
- 4 medio oficiales plantistas
- 4 ayudantes

### 3.3 Análisis FODA.

El análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) permite evaluar los factores internos y externos que pueden influir en el éxito de la empresa. A continuación, se detallan los principales aspectos que se deben considerar.

Tabla 1 Matriz FODA

| MATRIZ FODA 2024 | | | |
|---|---|---|---|
| **DEBILIDADES** | | **FORTALEZAS** | |
| D1 | MANEJO PLANILLAS EXCEL, OBSOLETO | F1 | CAPACIDAD ECONOMICA PARA ABSORVER COSTOS DE MEJORA |
| D2 | FALTA DE FORMACION DE PERSONAL ESPECIALIZADO | F2 | RAPIDA RESPUESTA A REQUERIMIENTOS DE CLIENTES |
| D3 | FALTA DE HERRAMIENTAS CON MEJOR TECNOLOGIA | F3 | EXPERIENCIA Y POSICIONAMIENTO EN EL SECTOR |
| D4 | STOCK DE PAÑOL DESACTUALIZADO | F4 | TECNOLOGIA DE EQUIPOS |
| D5 | PARADAS DE EQUIPOS SIN PROGRAMACIÓN | F5 | PREDISPOSICION DE DIRECCION Y GERENCIA PARA INVERTIR EN ASESORAMIENTO EXTERNO |
| D6 | ALTO NIVEL DE AUSENTISMO | F6 | FLEXIBILIDAD EN CAPACIDAD DE EQUIPOS |
| D7 | FALTA DE PERSONA ESPECIFICA RESPONSABLE DE AREA | F7 | ALTO GRADO DE RELACION CON PROVEEDORES ESPECIFICOS REPUESTOS DE PLANTAS |
| | | F8 | APERTURA AL CAMBIO Y MEJORAS |
| | | | |
| **AMENAZAS** | | **OPORTUNIDADES** | |
| A1 | DIFICULTAD PARA ENCONTRAR PERSONAL CAPACITADO | O1 | GENERAR VINCULOS CON ESCUELAS TECNICAS Y UNIVERSIDADES. PASANTES EN FORMACIÓN |
| A2 | INESTABILIDAD ECONOMICA DEL PAIS | O2 | ACCESO A NUEVAS FUENTES DE FINANCIACION |
| A3 | PROBLEMAS PARA IMPORTAR INSUMOS | O3 | APERTURA DE IMPORTACIONES |
| A4 | ALTA ROTACION DE PERSONAL | O4 | PROVEEDORES CHINA |
| A5 | EMPRESAS NUEVAS EN CRECIMIENTO | O5 | DIFICULTAD EN COMPETENCIA PARA COMPETIR EN CANTIDAD Y VARIEDAD DE EQUIPOS |
| A6 | UNICO PROVEEDOR OFICIAL EN EL PAIS | O6 | TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS |

Fuente: Elaboración propia

## 4. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Debido a la envergadura de la empresa y por la capacidad productiva de sus equipos, la mejor manera de asegurar la mejor disponibilidad de este tipo de equipos es con la implementación y uso de un plan de mantenimiento integral, involucrando a todos y cada uno de los actores participes en el proceso y por esto se propone como objetivo principal como desarrollo de este trabajo la implementación de un sistema de Mantenimiento Productivo Total (TPM) para equipos de tratamiento de áridos con el fin de mejorar la disponibilidad y la eficiencia de los equipos,

reducir costos de mantenimiento, mejorar la calidad de los productos y asegurar lugares de trabajo saludables y seguros para todos los colaboradores de la empresa.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1 Por qué TPM.

TPM tiene como objetivo primordial la eliminación sistemática de desperdicios como por ej:

- Roturas y Fallos.
- Preparación y ajuste de máquinas.
- Tiempos en vacío y paradas cortas.
- Velocidad de operación reducida.
- Defectos de calidad y en el proceso.
- Perdidas por puesta en marcha, cambios o paradas

### 5.2 La Base del TPM: 5S.

El TPM se basa en el Metodología 5S, esta metodología se centra en tener todo en su lugar y mantener el puesto de trabajo limpio, lo que facilita a las personas hacer su trabajo sin perder tiempo o arriesgarse a tener accidentes.

#### 5.2.1 Las 5S:

SEIRI – Clasificación: Consiste en identificar y separar los materiales necesarios de los innecesarios y en desprenderse de estos últimos
SEITON – Orden: Se trata de establecer el modo en que deben ubicarse e identificarse los materiales necesarios, de manera que sea fácil y rápido encontrarlos, utilizarlos y reponerlos.
SEISO – Limpieza: Basada en identificar y eliminar las fuentes de suciedad, asegurando que todos los medios se encuentren siempre en perfecto estado.
SEIKETSU – Estandarización: El objetivo es distinguir fácilmente una situación normal de otra anormal, mediante normas sencillas y visibles para todos dando lugar a un control visual.
SHITSUKE – Disciplina: Consiste en trabajar permanentemente de acuerdo con las normas establecidas.

### 5.3 Pilares del TPM.

- Mantenimiento Autónomo
- Mantenimiento Planificado
- Mantenimiento de Calidad
- Prevención del Mantenimiento
- Formación y Entrenamiento
- Salud, Seguridad y Medio Ambiente
- TPM en la Administración (oficina)

## 6. DIAGNOSTICO

### 6.1 Situación actual.

Los equipos que se seleccionaron para este estudio son la trituradora primaria PT600 interno TR-004 y Zaranda cribadora Warrior 1800 interno Z-016, ya que el 80% de la producción depende del material suministrado por estos equipos, de donde posteriormente se alimentan el resto de equipos como trituradoras secundarias o clasificadoras de menor porte.
Analizando estos equipos se observó que se destacan la cantidad de hs por paro de equipo en donde se evidencian lo siguientes problemas

- No se registran correctamente los mantenimientos realizados en los equipos.
- No se registran correctamente las horas de paro y/o disponibles de los equipos.
- Planes de mantenimiento no se realizan o son inexistentes.

- Se realizan muchos paros por Mantenimiento correctivos y no se evidencia información de aprendizaje para que no vuelva a ocurrir lo mismo.

### 6.2 Disponibilidad de equipos.

Para la elaboración del trabajo se realizó un estudio de la disponibilidad de los equipos a estudiar trituradora PT600 y zaranda Warrior 1800.

Tabla 2: Disponibilidad de equipos

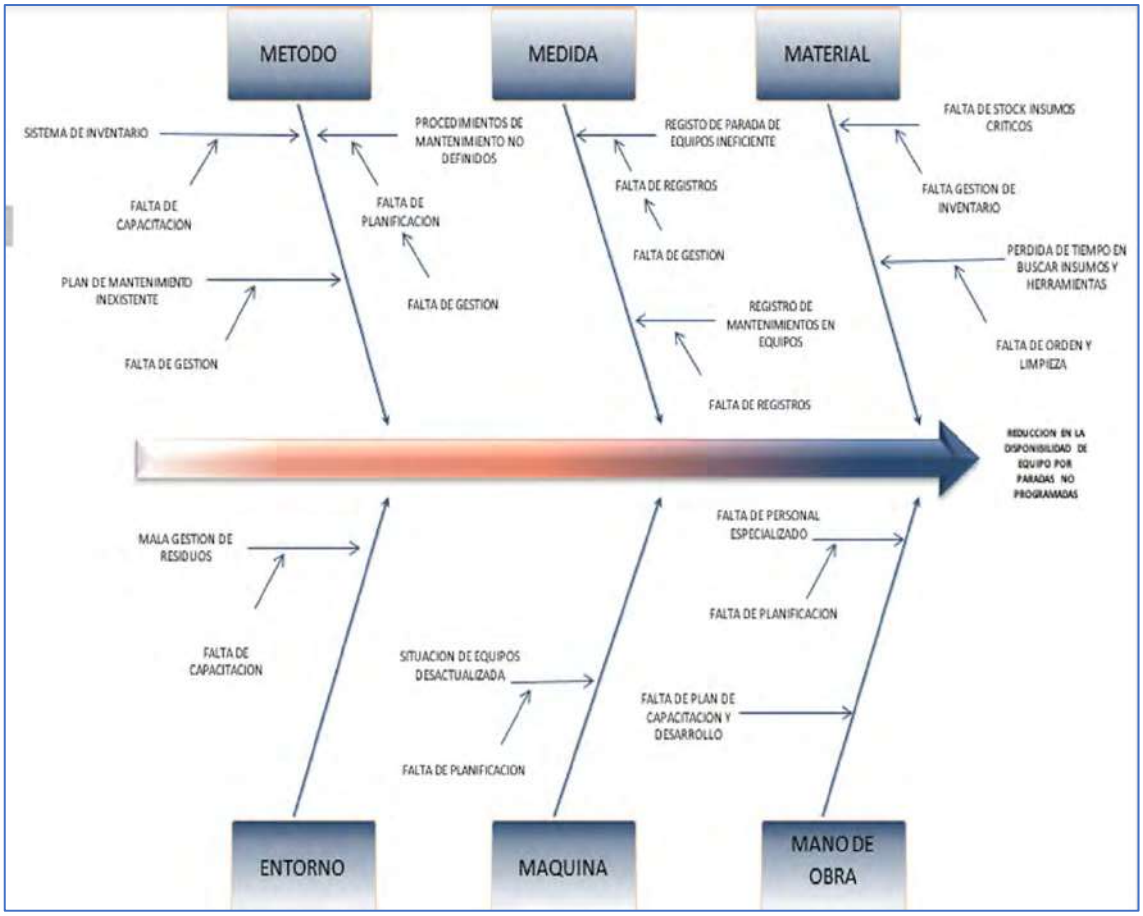
| DISPONIBILIDAD PT600 | | |
|---|---|---|
| ITEM | DISPONIBILIDAD | MES |
| 1 | 30% | ABRIL |
| 2 | 61% | MAYO |
| 3 | 58% | JUNIO |
| 4 | 86% | JULIO |
| 5 | 94% | AGOSTO |
| | | |
| **DISPONIBILIDAD WARRIOR 1800** | | |
| ITEM | DISPONIBILIDAD | MES |
| 1 | 68% | ABRIL |
| 2 | 79% | MAYO |
| 3 | 81% | JUNIO |
| 4 | 81% | JULIO |
| 5 | 85% | AGOSTO |
| 6 | 83% | SETIEMBRE |
| **PROMEDIO** | **79%** | |

Fuente: Elaboración propia

### 6.3 Análisis de causas.

Para analizar las causas principales de los problemas que llevan a que la disponibilidad de equipos se vea afectada debido a las hs de paradas no programadas, se realizado un diagrama de Ishikawa o también conocido diagrama de espina de pescado. En dicho diagrama se plantean las causas de los problemas en seis ejes principales, método, Medida, Material, Entorno o Medio ambiente, Maquina y Mano de Obra.

Imagen 1: Análisis causa efecto

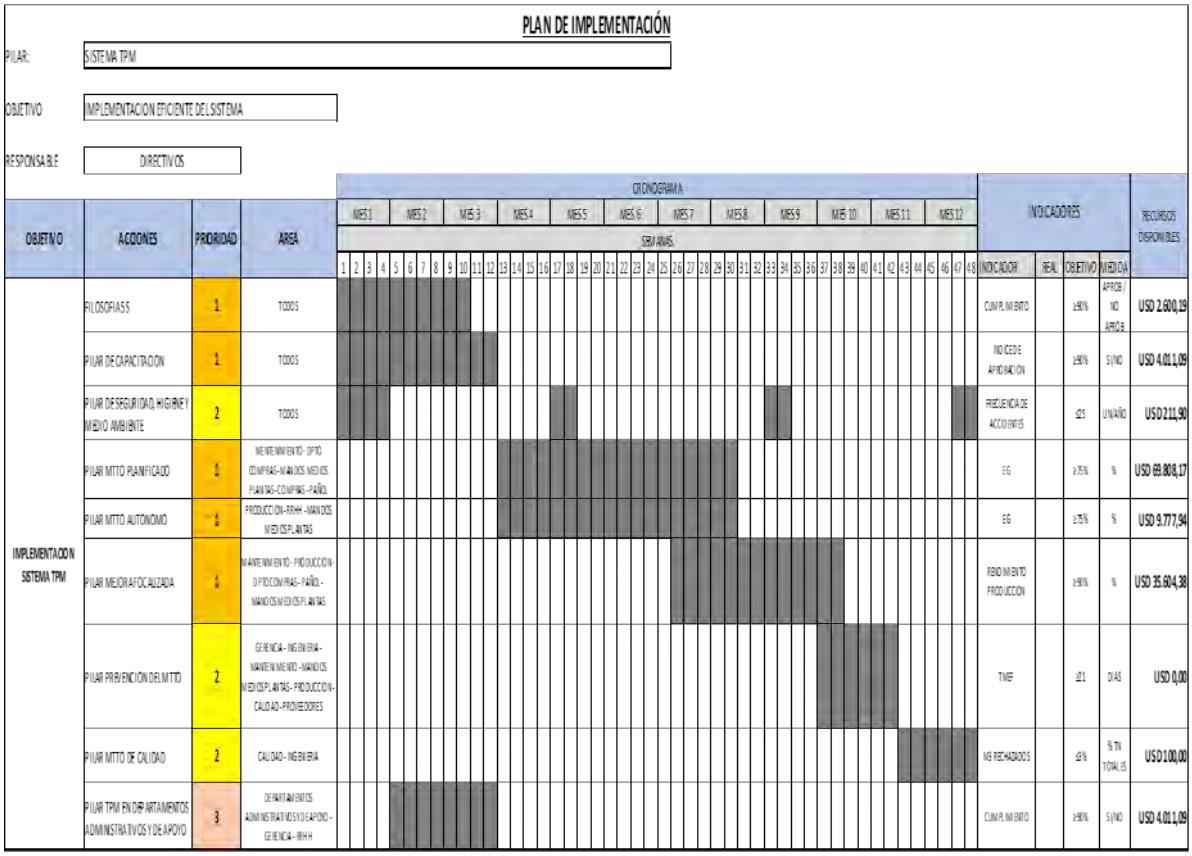



Fuente: elaboración propia

## 7. PLAN TÁCTICO - OPERTATIVO

Se elaboró un PTO para cada uno de los pilares que conforman el sistema TPM, incluida la filosofía 5s. El PTO cuenta con cronograma por cada acción, con información de prioridad, indicadores a alcanzar y costo por la implementación.

Imagen 2: Plan de Implementación




Fuente: Eleboración propia

## 7. INDICADORES

Algunos de los indicadores sugeridos para medir y controlar el sistema TPM son:

### 7.1 Eficiencia Global de los equipos OEE.

OEE se compone de tres subindicadores: la disponibilidad, la eficiencia y la calidad. Tener un OEE del 100% significa que el equipo estuvo operando todo el tiempo programado (disponibilidad), a la máxima velocidad según el tipo de trabajo (eficiencia) y que toda la producción fue bien procesada a la primera pasada (calidad).

Tabla 3. Descripción de indicadores

$$OEE = D \times E \times C$$

| MAYORES PERDIDAS DE OEE | |
|---|---|
| **CONCEPTO** | **DESCRIPCION** |
| Disponibilidad (D) | 1- Averias |
| | 2- Tiempo de reparaciones |
| Efectividad (E) | 3- Paradas y tiempos en vacío |
| | 4- Reducción de velocidad |
| Calidad (C) | 5- Productos defectuosos y reprocesos |
| | 6- Puestas en marcha sin produccion |

Fuente: Elaboración propia

### 7.2 Otros indicadores.

- Rendimiento de producción
- Tiempo medio entre fallas: MTBF
- Tiempo medio de reparación
- % Material rechazado
- Frecuencia de accidente
- Tasa de gravedad de accidentes
- Índice de capacitación
- Media de permanencia de personal
- Índice de incidentes y conflictos laborales

## 9. ANÁLISIS DE COSTOS

Se realizó un análisis de costo en base a precios correspondientes al mes de noviembre de 2024 y los mismos se encuentran valorizados en USD + IVA.
El análisis de costos se decidió hacerlo en dólares americanos para que al momento de actualizar precios sea más fácil poder actualizar el valor unitario de cada ítem al momento de decidir implementar el sistema TPM.

En la siguiente tabla se muestra el resumen de costos totales de implementación de TPM

Tabla 4. Costos de Implementación

| RESUMEN COSTOS TOTALES IMPLEMENTACION TPM | | | |
|---|---|---|---|
| **ITEM** | **PILAR** | **TOTAL USD + IVA** | **OBSERVACIONES** |
| 1 | 5S | USD 2.600,19 | |
| 2 | MANTENIMIENTO PLANIFICADO | USD 69.808,17 | |
| 3 | MANTENIMIENTO AUTONOMO | USD 9.777,94 | |
| 4 | MEJORA FOCALIZADA | USD 35.604,38 | |
| 5 | PREVENCION DEL MANTENIMIENTO | USD 0,00 | |
| 6 | MANTENIMIENTO DE CALIDAD | USD 100,00 | |
| 7 | TPM EN DEPARTAMENTOS ADMINISTRATIVOS Y DE | USD 4.011,09 | |
| 8 | CAPACITACION | USD 4.011,09 | |
| 9 | SEGURIDAD, HIGIENE Y MEDIO AMBIENTE | USD 211,90 | |
| | | **USD 126.124,77** | |

Fuente: Elaboración propia

## 9. IMPACTO ECONÓMICO

Por motivos de confidencialidad de la empresa, por decisión gerencial no se pudo obtener datos de costos reales del área de mantenimiento, pero si nos permitieron acceder al valor (usd/m3) de dos productos finales que se obtienen de los dos equipos que se analizaron en este trabajo:

- Precio final de piedra triturada Powerscreen PT600 **USD5.32/m3 + IVA**
- Precio final de base estabilizada 0-40 Powerscreen Warrior 1800 **USD18.75/m3 + IVA**

Teniendo estos valores se realiza análisis de impacto económico teniendo en cuenta lo siguiente:

1. Costo de hs maquina parada por mantenimiento correctivo mecánico y eléctrico de ambos equipos con relación a hs disponibles totales en 6 meses, suponiendo una mejora del 10% en hs perdidas por implementación de TPM. **Situación 1**

2. Costo de hs mantenimiento programado en ambos equipos suponiendo mejora del 5% en hs perdidas por implementación de TPM. **Situación 2**

Tabla 5. Análisis impacto económico

| Situaciones | Equipo | Beneficio Anual USD + IVA |
|---|---|---|
| 1 y 2 | PT600 | USD 41.161,00 |
| 1 y 2 | Warrior 1800 | USD 62.826,00 |
| | **Total USD + IVA** | **USD 103.987,00** |

| Beneficio Anual | Inversion | Impacto económico |
|---|---|---|
| USD 103.987,00 | USD 126.124,77 | -USD 22.137,77 |

Fuente: Elaboración propia

Analizando este valor de impacto económico se deduce que en lapso de 18 meses se podría recuperar la inversión para implementación de un sistema TPM.

## 10. CONCLUSIONES

La participación y el compromiso de todo el personal es esencial para lograr el éxito de este proyecto, ya que el sistema TPM se basa en la directa participación de todos los colaboradores de la empresa en la mejora continua y la eliminación de pérdidas.
Por lo tanto, es importante que la empresa genere un sistema de capacitación y formación al personal para que se garantice de manera fehaciente que las personas tengan los conocimientos necesarios para la implementación de TPM, se fomente un ambiente de trabajo colaborativo, seguro hacia las personas y el medio ambiente para que todo el personal se sienta valorado y respetado.
Si la empresa decidiera implementar el sistema TPM de manera efectiva, no solo se beneficiaría económicamente, sino que también se vería una mejora sustancial en cuestiones de orden, limpieza, seguridad, calidad de trabajo y sobre todo de calidad de vida de sus empleados, además, se lograría aumentar la vida útil de los equipos mejorando eficiencia, productividad, disponibilidad y defectos de calidad.

## 11. RECOMENDACIONES

1. Los directivos deben participar activamente y mostrar apoyo durante la implementación del sistema TPM, esto ayudará a que el personal se motive.
2. La comunicación debe ser lo más clara y real para que toda la empresa pueda ver los resultados que se van obteniendo a lo largo de la implementación del sistema, es importante poder mostrar los avances ya sean positivos como negativos. Esto le dará sentido de pertenencia a todo el personal.
3. Llevar registros de todo lo que se realice en base a TPM es de suma importancia, no solo para tener el seguimiento, sino también para tener base de análisis para realizar mejoras o ajustes del sistema.
4. Se deben realizar auditorías con seguimiento especifico y se deben mostrar los resultados para dejar en evidencia los resultados obtenidos.

5. Cada vez que se alcances objetivos sean o no en base TPM se sugiere a los directores que realicen reuniones rápidas de 10 minutos para mencionar los logros alcanzados, esto logrará que el personal se sienta altamente motivado.
6. Capacitar al personal de operación y mantenimiento en todo lo referido a equipos, esto logrará disminuir las horas por fallas, hs por mantenimiento programado sin perder la eficiencia de la tarea y que el personal de operación empiece a autogestionarse.
7. Promover ingreso de personal egresado de escuelas técnicas para formar y desarrollar personal con mejores capacidades técnicas.
8. Promover el uso de herramientas con tecnología de última generación, esto puede llevar a mejorar el rendimiento del personal de mantenimiento.
9. Analizar compra de repuestos originales de algunos equipos. El no disponer de insumos críticos que no son fáciles de reparar puede causar bajas importantes en la disponibilidad mecánica de los equipos. Ejemplo, placa fusible y grillas de TR600.
10. Las propuestas de mejora son trabajos preliminares o propuestas iniciales, se necesitan especialistas en cada área y por ende se recomienda consultar con personal especializado en cada uno de los campos analizados.

**BIBLIOGRAFIA**


- Manual de Operación y Mantenimiento Warrior 1800 – Powerscreen Terex.
- Manual de Operación y Mantenimiento Premier Track 600 – Powerscreen Terex
- TPM en Industrias de Procesos – Tokutaro Suzuki.
- Desarrollo de un plan de mantenimiento para las máquinas de la empresa Planhofa mediante el TPM – Quezada Pedrea John.
- TPM en un Entorno de Lean Management – Lluís Cuatrecasas; Francesca Torrell.
- Técnicas de Mantenimiento Industrial – Calpe Institute of Technology.
- Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo 19587/72
- Decreto 351/79 – Reglamentación de la Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo.

# BARRERAS Y DESAFÍOS A LA ECONOMÍA CIRCULAR EN CADENAS DE TECNOLOGÍA Y ELECTRODOMÉSTICOS

Ambrústolo, Mariela B., Migueles, Marina A.

*Grupo de Investigación y extensión Gestión Integrada, Personas y Mejora continua. Departamento de Ingeniería Industrial. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Mar del Plata*
*mmigueles@fi.mdp.edu.ar, ambrus@fi.mdp.edu.ar*

**RESUMEN**

La creciente cantidad de dispositivos electrónicos y su interconexión han generado un aumento significativo en los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), que contienen materiales peligrosos y valiosos. Sin embargo, solo una pequeña parte se recicla adecuadamente, lo que genera pérdida de recursos y contaminación. Ante este desafío, es fundamental avanzar hacia una economía circular en las cadenas de suministro, promoviendo el rediseño de productos, reutilización y reducción de residuos. Esto no solo protege el ambiente, sino que impulsa la innovación y nuevas oportunidades de negocio. El objetivo del trabajo es presentar un relevamiento general y sistemático de la literatura sobre posibles barreras para la implementación de estrategias de economía circular en las cadenas de suministro que generan RAEE.

Los resultados revelan una escasez de estudios sobre el tema, especialmente en países en desarrollo, lo que evidencia la necesidad de mayor investigación. Para una gestión efectiva de RAEE es clave adoptar enfoques más amplios que el reciclaje, el rediseño de productos, la recolección y reutilización eficiente, y la promoción de prácticas de reparación y remanufactura. Las principales barreras identificadas son: tecnológicas y regulatorias, organizacionales, culturales y relacionadas con la falta de alianzas estratégicas. Se concluye que es esencial profundizar en estas barreras y desarrollar prácticas para superarlas y avanzar hacia sistemas más sostenibles.

**Palabras Claves:** Economía circular, Cadenas de suministro, Aparatos eléctricos y electrónicos, Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), Barreras de implemenatción y desafíos.

**ABSTRACT**

The growing number of electronic devices and their interconnection has led to a significant rise in waste electrical and electronic equipment (WEEE), which contains both hazardous and valuable materials. However, only a small share is properly recycled, resulting in resource loss and pollution. In response to this challenge, it is essential to move toward a circular economy in supply chains by promoting product redesign, reuse, and waste reduction. This not only protects the environment but also drives innovation and new business opportunities. The aim of this work is to present a general and systematic review of the literature on potential barriers to implementing circular-economy strategies in WEEE-generating supply chains.

The results reveal a scarcity of studies on the topic, especially in developing countries, underscoring the need for further research. Effective WEEE management requires approaches that go beyond recycling and encompass product redesign, efficient collection and reuse, and the promotion of repair and remanufacturing practices. The main barriers identified are technological and regulatory, organizational, cultural, and those related to the lack of strategic partnerships. It is concluded that these barriers must be examined in greater depth and that practices should be developed to overcome them and advance toward more sustainable systems.

**Keywords: Circular economy, Supply chains, Electrical and electronic equipment (EEE), Waste electrical and electronic equipment (WEEE), Implementation barriers and challenge**

## 1. INTRODUCCIÓN

El mundo está experimentando una profunda transformación digital que está cambiando cómo vivimos, trabajamos, aprendemos, socializamos y hacemos negocios. Según Baldé et al. (2024) la proliferación de dispositivos electrónicos y la creciente interconectividad han aumentado significativamente los objetos conectados a Internet, como electrodomésticos, bicicletas eléctricas, monitores de salud, entre otros. Este incremento ha llevado a un aumento en la cantidad de equipos eléctricos y electrónicos (EEE) y residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). El destino de estos equipos genera residuos con materiales peligrosos y valiosos, destacando la necesidad urgente de gestionar adecuadamente estos desechos para mitigar riesgos ambientales y aprovechar los recursos.

Los RAEE, también conocidos como *e-waste*, son "los artículos de todo tipo de aparatos eléctricos y equipos electrónicos (AEE) y sus piezas que han sido desechados por el propietario como residuos sin intención de reutilización" (STEP, 2014).

De acuerdo con el Observatorio Mundial de Residuos Electrónicos en 2022, se produjeron a nivel mundial 62 millones de toneladas de desechos electrónicos el equivalente a un promedio de 7,8 kg per cápita por año, lo que representa un aumento del 82% respecto a 2010. Se prevé que esta cifra aumente un 32 % más, llegando a 82 millones de toneladas para 2030. Solo el 1% de la demanda de tierras raras se cubre mediante el reciclaje de estos desechos. Menos del 23 % de los desechos electrónicos fueron recolectados y reciclados adecuadamente, dejando sin aprovechar recursos y aumentando los riesgos de contaminación a nivel mundial. Así mismo esto significa que se están desperdiciando miles de millones de dólares en recursos costosos (Baldé et al, 2024).

Los aparatos eléctricos y electrónicos contienen plásticos y diversos materiales valiosos: metales preciosos (oro, plata, cobre, platino y paladio), así como hierro, aluminio además de metales peligrosos y escasos, como mercurio, plomo, cadmio y productos químicos peligrosos. Su recuperación y tratamiento de los residuos electrónicos representan un reto para los sistemas de gestión de residuos.

Para enfrentar los desafíos que presentan los desechos electrónicos, es fundamental adoptar una perspectiva integral del proceso de producción y las tendencias de consumo de los dispositivos que los originan, así como su ciclo de vida. Es crucial comprender la considerable cantidad de residuos y contaminación producidos en su fabricación y transporte (Gestión Integral de RAEE, 2020).

La generación de RAEE es una de las corrientes de residuos de mayor crecimiento a nivel mundial (Berwald et. al, 2021). Frente a la escasez de materias primas y la ineficiente gestión de residuos las empresas comienzan a reevaluar sus modelos de negocio. En lugar de seguir un enfoque lineal tradicional, se comienza adoptar los principios de la economía circular. (Rosa, 2019).

### 1.1 Modelos de negocios circulares

En una economía lineal, se extraen materiales, se fabrican productos y finalmente se desechan. La economía circular (EC), en cambio, busca eliminar los residuos desde el diseño y se basa en tres principios: eliminar residuos y contaminación; circular productos y materiales en su máximo valor, y regenerar la naturaleza. Este modelo se apoya en energías y materiales renovables y desvincula la actividad económica del uso de recursos finitos. Es un sistema resiliente que beneficia a las empresas, las personas y el medio ambiente, y aborda desafíos globales como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, los residuos y la contaminación (*Ellen MacArthur Foundation,s.f*).

En este sentido Preciado Ramírez et al. (2023) expresa que la cadena de suministro es crucial en la economía circular, abarcando desde la extracción de materias primas hasta la entrega del producto final. La circularidad implica rediseñar los flujos de materiales, energía e información para maximizar el valor de los recursos, minimizar el desperdicio y la huella ambiental. Además, fomenta la colaboración e innovación entre los actores involucrados, creando nuevas oportunidades de negocio. Así mismo identifica que implementar estrategias circulares en la cadena de suministro ofrece beneficios económicos, ambientales y sociales:

El enfoque circular en la gestión de RAEE busca extender la vida útil de los equipos a través de la reutilización, donación y comercialización de segunda mano. Esto requiere habilidades técnicas y piezas de repuesto para reparaciones. Los fabricantes deben diseñar productos duraderos y reparables, y proporcionar información para su desamblaje y reparación. Cuando no se pueden reutilizar o reparar, se deben recuperar componentes valiosos para reducir el uso de nuevos recursos. Los generadores de RAEE deben estar informados y motivados para separar y entregar correctamente estos residuos a los recolectores apropiados (Gestión Integral de RAEE, 2020).

### 1.2 Barreras y desafíos para el desarrollo de la economía circular

La transición hacia este modelo enfrenta múltiples barreras y desafíos que deben ser comprendidos y abordados para facilitar su implementación efectiva y sostenible. Dependiendo del enfoque y el contexto en el que se analicen poseen diversas clasificaciones, entenderlas es esencial para diseñar estrategias efectivas que faciliten la transición hacia un modelo económico más sostenible y resiliente.

Blasenbauer et al. (2020) desde una mirada centrada en el hombre plantean que, para aprovechar eficazmente los recursos antropogénicos en el contexto de una EC, se deben superar al menos 12 desafíos. En la figura 1 se muestra la interacción de los principales factores que se agrupan en 3 categorías de acuerdo a Winterstetter et al (2021).

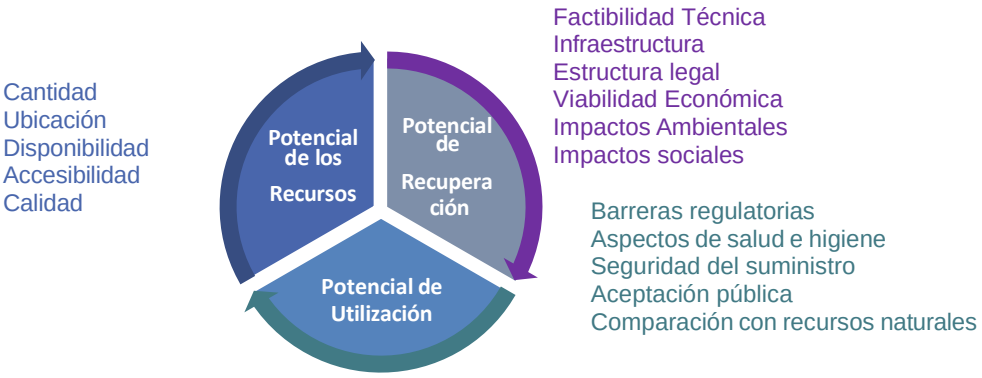



*Figura 1 – Recursos antropogénicos en el contexto de una Economía Circular. Fuente: elaboración propia en base* Winterstetter et al (2021).

En la tabla 1 se presentan los diferentes desafíos relacionados con los recursos antropogénicos.

*Tabla 1 – Desafíos de acuerdo a Potencial de los Recursos, de Recuperación y de Utilización.*

| Potencial de los Recursos | Potencial de Recuperación | Potencial de Utilización |
|---|---|---|
| **Cantidades Desconocidas**: La planificación de actividades de extracción es difícil debido a la falta de información de cantidades de recursos disponibles, como productos al final de su vida útil, edificios obsoletos y vertederos antiguos.<br><br>**Ubicación y Accesibilidad**: La falta de información sobre la ubicación, accesibilidad y disponibilidad temporal de los recursos antropogénicos impide su uso eficiente.<br><br>**Calidad de los Materiales**: La recuperación se ve obstaculizada por la falta de información sobre la calidad de las existencias y flujos de materiales antropogénicos, incluyendo su composición y contaminantes potenciales. | **Marco Jurídico e Infraestructura**: Recogida y reciclaje de residuos inadecuados y ausencia de un entorno bien regulado para recicladores dificultan la recuperación eficiente.<br><br>**Viabilidad Técnica**: Los procedimientos técnicos para recuperar materiales de algunos recursos son inmaduros, y los impactos de las decisiones clave para la implementación de proyectos de recuperación son difíciles de estimar.<br><br>**Viabilidad Económica y Ambiental**: Los ingresos esperados de los recursos recuperados a menudo no cubren los costos de extracción, y las emisiones no están justificadas. | **Barreras Legales y Regulatorias**: Las cargas administrativas causadas por barreras legales y regulatorias pueden impactar negativamente en la comercialización de materiales reciclados.<br><br>**Preocupaciones Ambientales y de Seguridad**: La reintroducción de materiales reciclados con componentes nocivos puede llevar a acumulación y dispersión de sustancias<br><br>**Suministro Confiable**: La estabilidad del suministro de materiales antropogénicos depende de las cantidades recolectadas por las autoridades locales y tecnología de separación<br><br>**Calidad y Mercados**: Hay discordancia entre la calidad de los residuos y las materias primas<br><br>**Aceptación Pública**: Los usuarios finales o productores perciben la calidad de materiales recuperados como baja, aunque no sea real.<br><br>**Comparabilidad con Materias Primas Vírgenes**: No es posible realizar una comparación transparente de condiciones entre recursos antropogénicos y materias primas. |

*Fuente: elaboración propia en base a Blasenbauer et al. (2020) & Winterstetter et al (2021).*

Abordar estos desafíos mediante la clasificación de recursos puede ayudar a evaluar los proyectos de recuperación de recursos y respaldar la toma de decisiones para su implementación sostenible. Esta mirada presentada de la EC permite un abordaje integral de la cadena de suministro. Varios autores han intentado clasificar y definir las diferentes problemáticas que surgen con el objeto de definir una agenda de trabajo que permita la incorporación de estas estrategias.

Existe un enorme entusiasmo en torno a la economía circular en el ámbito académico, y en los últimos años ha surgido una vibrante comunidad de investigación interdisciplinaria en torno a este tema, aunque aún es un campo incipiente. Ranta et al (2018) definen que los modelos de negocio de EC se consideran palancas importantes en la transición. La evidencia empírica disponible del estudio de barreras y facilitadores de estos modelos aún es limitada y faltan evaluaciones específicas de cada sector. Geissdoerfer et al (2017) enunciaron que es un tema emergente cuyos primeros estudios en Europa han incrementado el interés a partir de trabajos de autores chinos debido a los controles regulatorios.

En el 2022 Medina y Freire-Pesántez desarrollaron un trabajo de revisión bibliográfica de los últimos cinco años que buscaba identificar las barreras para la implementación de la EC en países en vías de desarrollo con el fin de generar un aporte social que permita pensar la transición del modelo clásico de producción lineal a uno amigable con el ambiente. Como resultado encontraron 38 barreras que fueron clasificadas en cuatro categorías que se desarrollan a continuación:

1. Barreras tecnológicas: Infraestructura insuficiente, dificultades para implementar equipos y procesos especializados, ausencia de una cadena de suministro de materiales, acceso limitado a tecnología y brechas de conocimiento técnico.

2. Barreras organizacionales: Obstáculos relacionados con la estructura y funcionamiento de las organizaciones, como resistencia al cambio, falta de capacitación del personal y dificultades en la coordinación interna. Internamente también pueden mencionarse falta de capital asociado a altos costos de inversión para procesos y equipos amigables ambientalmente, dificultades para generar innovación en procesos por su complejidad, enfoques a corto plazo y *greenwashing* (falsa impresión de organizaciones amigables con el ambiente). Así como baja sostenibilidad financiera, dificultades en control y monitoreo, problemas de administración y falta de apoyo de accionistas e inversores.

3. Barreras institucionales: Problemas vinculados a la falta de marcos regulatorios claros, políticas públicas inadecuadas y limitada colaboración entre entidades gubernamentales y privadas. Se suman falta de planes de implementación efectiva, gran cantidad de prácticas informales, dificultades en los sistemas de recolección de materiales y espacio para tratamiento e información incompleta. Podemos mencionar también bajos costos de extracción de materias primas o materiales poco ecológicos, falta de apoyo y financiamiento de acciones, planes de concientización y capacitación entre otros.

4. Barreras culturales: Dificultades derivadas de la falta de conciencia y educación sobre los beneficios de la economía circular, así como de prácticas arraigadas que favorecen un modelo lineal de producción y consumo. Falta de presión social derivada de estas limitaciones, baja cultura del reciclaje, incertidumbre sobre los beneficios de la EC y baja conceptualización que impide su adhesión.

Dentro de las cadenas de suministro más importantes, el sector de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) es un sector clave a raíz del gran crecimiento en el panorama mundial y el limitado progreso hacia un modelo circular (Rizos and Bryhn, 2022). Los autores desarrollaron un marco conceptual de barreras y facilitadores para la implementación de la EC entre los años 2018 a 2020 (Figura 2).

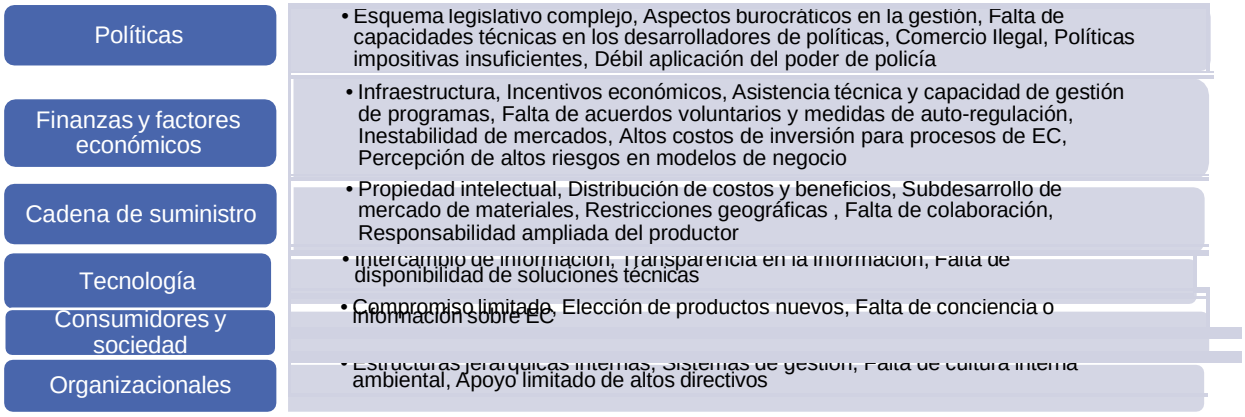



*Figura 2 – Barreras y facilitadores para la implementación de medidas de fomento de la EC*
*Fuente: elaboración propia en base a* Rizos and Bryhn (2022).

El objetivo del artículo es presentar un relevamiento general y sistemático de la literatura sobre posibles barreras para la implementación de estrategias de economía circular en las cadenas de suministro que generan RAEE (excluyendo todos los componentes específicos de energías alternativas).

## 2. METODOLOGÍA

La metodología para el trabajo de investigación incluyó una búsqueda bibliográfica sistemática y se desarrolló utilizando diferentes procedimientos metodológicos.

Como actividad inicial se plantearon las preguntas de investigación que se pretendía abordar. A partir de esta definición del alcance se realizó un rastreo no sistemático de la temática con el objeto de definir las palabras claves. Luego se desarrolló un análisis bibliométrico en la base *Dimensions*, completa colección de datos de investigación desarrollada por *Digital Science* en colaboración con más de 100 organizaciones de investigación líderes en todo el mundo Fue seleccionada por su importancia y por su característica de acceso abierto.

Los datos bibliométricos fueron importados en *VOSviewer,* que permite la construcción y visualización de mapas y análisis de relaciones entre autores, países e instituciones entre otros.

A partir del análisis de la información recabada se observa que, para el logro de los objetivos de la investigación, la búsqueda sistemática debía ser más específica, al ajustar los criterios de búsqueda, sólo se seleccionan muy pocos artículos en la base *Dimensions*. Es por ello que se trata de abarcar las bases de datos más utilizadas (Ver figura 3 generada por *Google Trends*) para tratar de hallar la mayor cantidad de artículos específicos y actuales. Se incluyeron *Google scholar*, *Science Direct, Scielo, Dialnet, Emerald e Engineering Village* adecuandose la fórmula de búsqueda a cada plataforma.

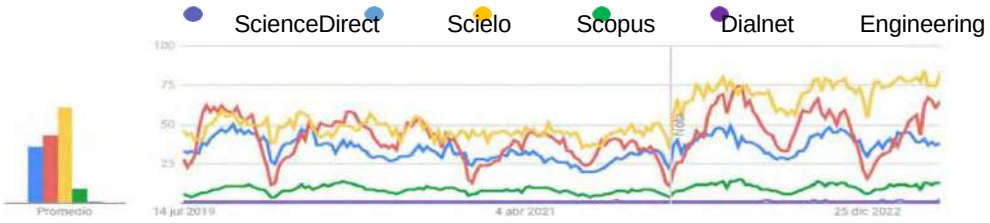



*Figura 3 – Popularidad de términos de búsqueda de las principales Bases de Datos. Fuente: Google Trends*

A partir de los resultados obtenidos se generó un repositorio de los artículos a analizar en Microsoft Excel para dar respuesta a las preguntas de la investigación.

## 3. DESARROLLO Y RESULTADOS

### 3.1 Definición de preguntas de investigación y criterios de búsqueda

En el contexto de este estudio, se ha realizado una exhaustiva revisión bibliográfica con el objetivo de identificar las principales tendencias, debates y vacíos en la literatura existente sobre las barreras y desafíos de la implementación de estrategias de economía circular en la cadena de suministro en industrias tecnológicas y de electrodomésticos. Se han formulado las siguientes preguntas de investigación, para profundizar aspectos clave y proporcionar una base para futuras investigaciones:

¿Cuáles son las barreras y desafíos y desafíos en la cadena de suministro que dificultan la adopción de estrategias de EC para la gestión de los RAEE?

¿Cuáles son las principales estrategias de Economía circular (EC) utilizadas para la minimización y gestión de los RAEE en la cadena de suministro?

¿En qué lugares se han desarrollado investigaciones científicas respecto a las barreras y desafíos que dificultan la adopción de estrategias de EC para la gestión de los RAEE?

Estas preguntas no solo reflejan las áreas de mayor interés, sino que también destacan las oportunidades para contribuir al desarrollo teórico de la disciplina para avanzar en la comprensión del tema del estudio y ofrecer aportes tanto a la comunidad académica como a los profesionales del sector.

Para garantizar una revisión exhaustiva y precisa de la literatura, se seleccionaron cuidadosamente una serie de palabras clave que reflejan los conceptos fundamentales y las áreas de interés del presente estudio mostradas en la Tabla 2.

Los términos elegidos, fueron seleccionados en función de su frecuencia y relevancia en la literatura existente, así como por su capacidad para capturar un amplio espectro de investigaciones relacionadas.

Tabla 2 – Palabras claves seleccionadas en la búsqueda

| Tema central | Subtema | Enfoque | Proceso |
|---|---|---|---|
| **Supply chain** | Circular economy | Barrier*, Obstacle*, Impediment, Problem* Issue, Difficult* Disadvantage Challenge*, Defiance* | Technological Industr* Technological Manufacturing Electronic Devices, Digital devices e-waste, WEEE, Waste Electrical Electronic Equipment, Electronic Equipment |
| **Value chain** | Circular approach | | |

A partir de las mismas, se generó la fórmula de búsqueda de la figura 4 que contempla el tema de estudio con una amplia gama de enfoques y perspectivas, asegurando la integridad y profundidad del análisis.

("supply chain" OR "value chain") AND ("Circular economy" OR "circular approach") AND (Barrier* OR Obstacle* OR impediment OR Problem* OR issue OR Difficult* OR disadvantage OR Challenge* OR Defiance*) AND ("technological Industr*" OR "technological manufacturing" OR "Electronic devices" OR "Digital devices"OR "e-waste" OR "WEEE" OR "Waste Electrical Electronic Equipment")

*Figura 4 – Fórmula a aplicar en la revisión bibliográfica. Fuente: Elaboración propia*

### 3.2 Desarrollo del análisis bibliométrico

El desarrollo inicial del enfoque bibliométrico de la búsqueda realizada en *Dimensions* proporciona una visión cuantitativa y cualitativa de la producción científica, facilitando la identificación de patrones y la evaluación del impacto de las investigaciones en la comunidad académica. Se ajustó la búsqueda a todo el texto de artículos científicos desarrollados a partir del 2015 ya que se entiende que es cuando la temática de economía circular presenta un crecimiento exponencial (do Nascimento y De Souza, 2020). La misma fue desarrollada el 26 de mayo de 2024 y se obtuvieron un total de 8.083 artículos.

En las Figura 5 y 6 se presenta una progresión de la generación de artículos en función del tiempo y su clasificación respecto a las categorías de investigación más importantes.




*Figura 5 – Número de publicaciones por año*
*Fuente: Elaboración propia en base a Dimensions*

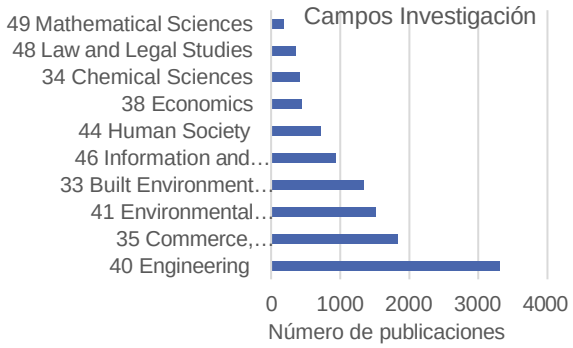



*Figura 6 – Artículos de las 10 categorías principales*
*Fuente: Elaboración propia en base a Dimensions*

Los datos bibliométricos fueron importados a *VOSviewer* para la construcción y visualización de mapas. Al generar análisis de co-autoría se visualizaron 10 *clusters* o grupos distintos de colaboración entre autores en la red de publicaciones analizada evidenciándose áreas interdisciplinarias o multidisciplinarias en un campo amplio y complejo sin autores sobresalientes en gran medida.

Resulta asimismo interesante poder identificar en las figuras 7 y 8 los países que intervienen en el desarrollo de investigaciones como así también las principales instituciones referentes.

Se destaca en la figura 7 uno de los mayores productores de conocimiento es China, seguida de Reino Unido, India, Estados Unidos e Italia y en cuanto a las principales instituciones resalta como referente el *Politécnico di Milano*, universidad de la comunidad europea, que genera consistencia respecto al avance en el campo. Luego se aprecia una gran cantidad de relaciones en el resto de los *clusters.*

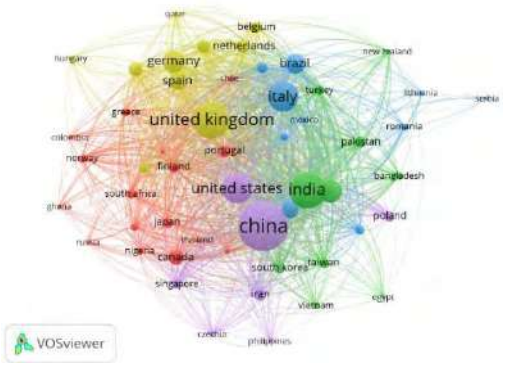



*Figura 7 – Relación entre los principales países referentes de las publicaciones. (VOS viewer)*

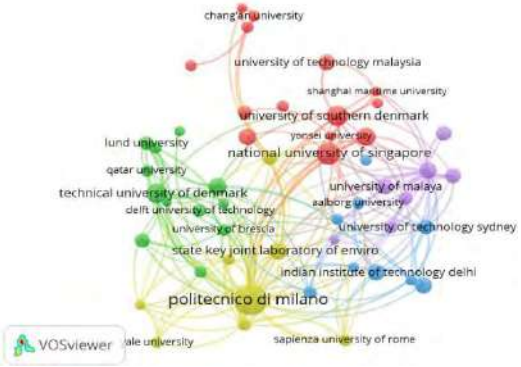



*Figura 8 – Relación entre las 50 instituciones mayores productoras de conocimiento.(VOS viewer)*

Otro aspecto fundamental a analizar es el conteo de factores mencionados en título y resumen que nos permite identificar los conceptos con mayor importancia en el volumen de trabajos analizados.

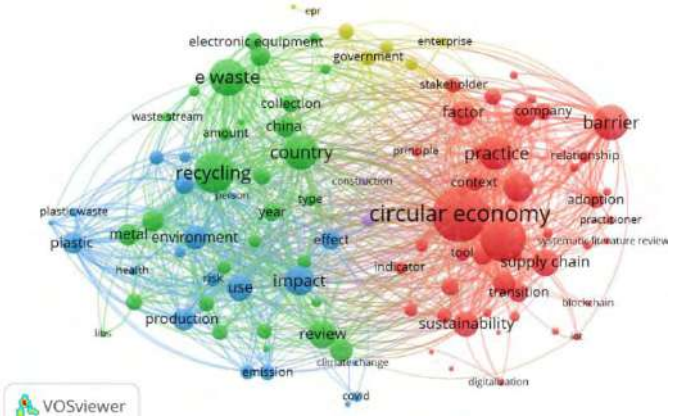



*Figura 9 – Factores mencionados en un número mayor a 100 veces. Fuente: VOS viewer*

En la figura 9 se observan 5 *cluster* principales, el más importante liderado por el término economía circular en el marco de las cadenas de suministro, identificando el término *barrier* en el mismo c*luster*. Surge un segundo *cluster i*mportante donde el término *e-waste* junto a *recycling* lideran los factores mencionados y un tercer *cluster* donde impacto y ambiente son los términos más distinguidos. Siendo llamativa la polarización de conceptos y falta de interacción entre economía circular y *e-waste.*

### 3. 3 Desarrollo de la revisión bibliográfica

Aunque este análisis bibliométrico proporciona una visión general del campo de conocimiento, es crucial centrarse en objetivos específicos para responder adecuadamente a las preguntas de investigación. Por esta razón, se desarrolla un estudio bibliográfico limitando el alcance de la revisión a artículos científicos de acceso libre que contengan palabras clave seleccionadas en el título y/o resumen, y que hayan sido publicados en los últimos cinco años. Se aplicaron criterios estrictos de exclusión, como la repetición, idiomas diferentes al inglés o español, tesis, citas, libros y artículos muy específicos, así como aquellos relacionados con otras cadenas de suministro o procesos de energía eólica o solar. Inicialmente, se creó un repositorio que identificó 98 artículos, los cuales fueron evaluados mediante la lectura de los resúmenes, resultando en el estudio de 53 artículos. En una segunda fase de análisis, enfocada en identificar las barreras y desafíos para la implementación de estrategias de economía circular en las cadenas de suministro de industrias tecnológicas y de electrodomésticos, se revisaron exhaustivamente 37 artículos completos incluyendo los de rastreo inicial. La distribución de estos se muestra en el diagrama de árbol de la Figura 10. En la primera fila, de valores se observa el número de trabajos seleccionados a partir de la lectura de título y resumen y en la segunda, la selección para la conformación del repositorio final.

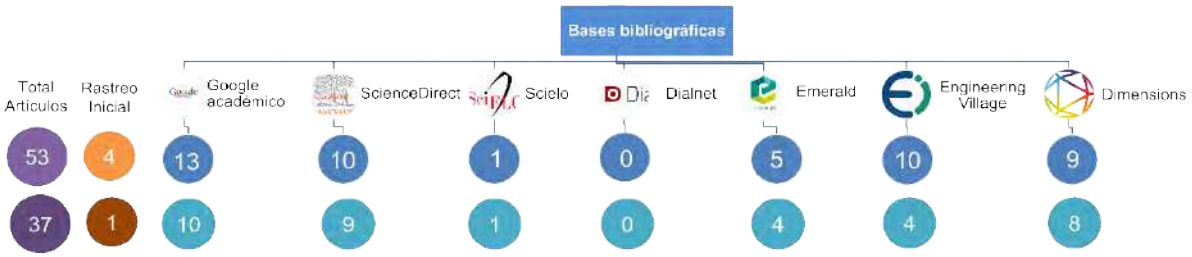



*Figura 10 – Diagrama de Árbol de revisión bibliográfica exhaustiva. Fuente: Elaboración propia*

Para el periodo de análisis de 2019 a primeros meses del 2024 se observa en la figura 11 un aumento en el crecimiento del 22.47% a 2023 de artículos en estas temáticas. Por otra parte, al analizar las publicaciones no se observa una repitencia que permita identificar alguna fuente excepto el *Journal of Cleaner Production* que se destaca entre el total de 28 revistas con un aporte del 19%.

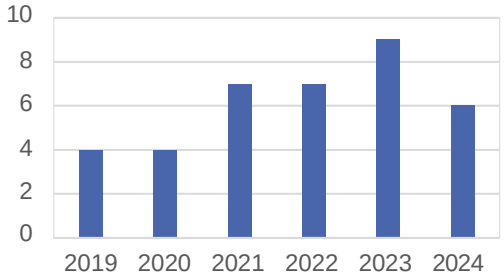



*Figura 11 – Número de artículos por año*
*Fuente: Elaboración propia*

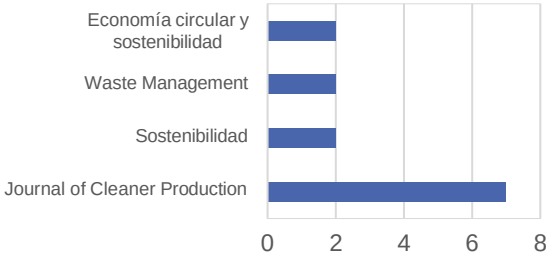



*Figura 12 – Número de artículos por Publicación*
*Fuente: Elaboración propia*

Del análisis de los artículos se identifica que el estudio de las barreras para la implementación de la EC en la gestión de los RAEE tuvo como objeto de estudio un 56.7% Países desarrollados, 28.3% Países emergentes y 8.3 % Países en desarrollo y a nivel mundial 6.7% de los artículos (figura 13).

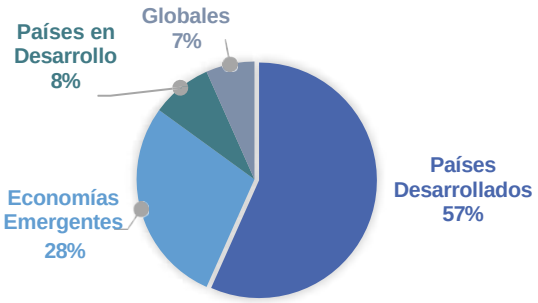



*Figura 13 – Clasificación por países*
*Fuente: Elaboración propia*

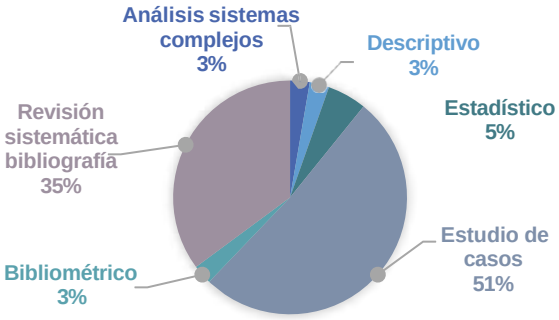



*Figura 14 – Artículos de acuerdo con la metodología*
*Fuente: Elaboración propia*

Los principales países desarrollados incluidos en los artículos en estudio son principalmente de la Unión Europea, el Reino Unido y Estados Unidos, en cuanto a los países emergentes principalmente Brasil, India y China y los países en desarrollo principalmente Nigeria. Se destaca que Argentina sólo se aborda parcialmente en un artículo. En cuanto a la metodología de estudio de los artículos seleccionados el 51.4% representan estudios de caso, 35.1% revisión sistemática de bibliografía, 5.4 % estadísticos, 2.7 % descriptivos y otros 2.7% métodos de análisis de sistemas complejos (figura 14)

En cuanto a la metodología de estudio de los artículos seleccionados el 51.4% representan estudios de caso, 35.1% revisión sistemática de bibliografía, 5.4 % estadísticos, 2.7 % descriptivos y otros 2.7% métodos de análisis de sistemas complejos (figura 14).

### 3. 4 Análisis de las barreras y desafíos de la implementación de estrategias de economía circular en la cadena de suministro del sector AEE y la gestión de RAEE.

A partir de las diferentes clasificaciones encontradas en el marco teórico se constituye una clasificación para el análisis de los artículos seleccionados de acuerdo a las categorías presentadas en la Figura 15.

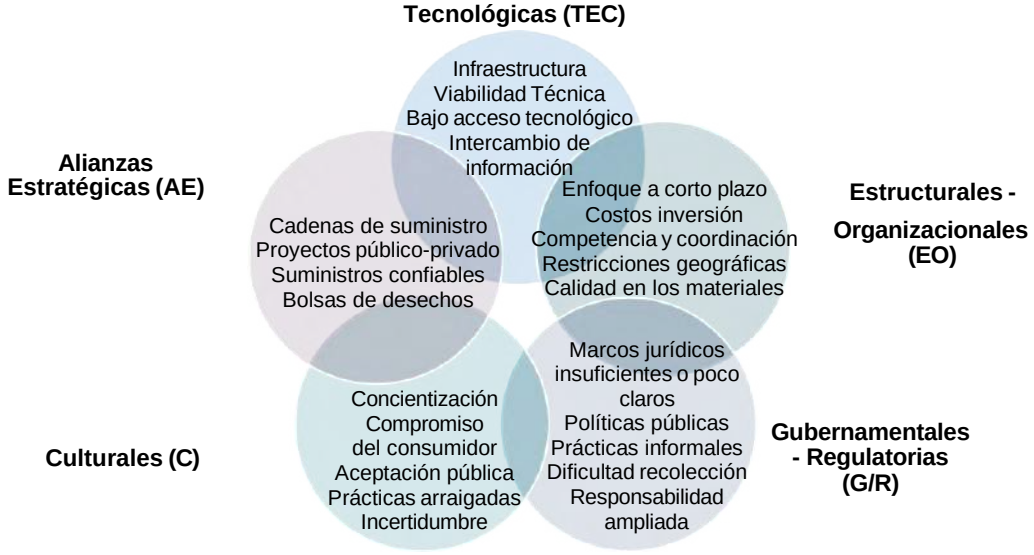



*Figura 15 – Factores abordados en categorías de análisis de barreras y dificultades. Fuente: Elaboración propia*

En la tabla 3 se muestran los diferentes autores y las barreras y dificultades para la implantación de estrategias de EC en la gestión de los RAEE que encontraron.

Tabla 3 –Autores, barreras y dificultades EC en gestión de RAEE. *Fuente: elaboración propia*

| Autores / Barreras/ | TEC | EO | G/R | C | AE |
|---|---|---|---|---|---|
| Aminoff, et al. (2021); Winterstetter et al. (2021); Dwivedi et al. (2020); Moyo et al. (2022) | X | X | X | X | X |
| Ghisellini et al. (2023); Medina-Abad et al. (2023); Ting et al. (2023) | X | X | X | X | |
| Chaudharyet al. (2019) | | X | X | X | |
| Ahmad (2024) | X | | X | | X |
| Blunck et al. (2019); Sawe et al. (2021) | X | X | X | | |
| Cole et al. (2019) | X | | X | X | |
| Karpen et al. (2023) | X | X | | X | |
| Ajay et al. (2022); Garrido-Hidalgo et al. (2019); Muhittin et al. (2021) | X | X | | | |
| Gaines et al. (2021); Sahajwalla et al. (2023) | X | | | X | |
| Berwald et al. (2021); Thapa et al. (2022); Xavier et al. (2023); Shashi et al. (2020) | X | | X | | |
| Morales-Urrutia (2023); Brito et al. (2021) | | | X | | X |
| Obiora et al. (2024); Rizos et al. (2022) | | X | X | | |
| Negrete-Cardosoet al. (2022) | | | X | X | |
| Tong et al. (2024) | X | | | | X |
| Afroz et al. (2020); Hunger et al. (2024); Kannan et al. (2024) | | | | X | |
| Barouta et al. (2022); Majiet al. (2023); Andersen (2021) | | | X | | |
| Mesjasz-Lech (2023) | | X | | | |
| Tansel (2020) | X | | | | |

A partir de la Tabla 3 resulta importante mostrar visualmente la distribución de las interacciones de las barreras y desafíos identificados. Puede observarse que pocos autores abordan la totalidad de las categorías analizadas, sin embargo, la mayoría de los autores al menos identifica tres tipos de barreras que impiden la implementación de estrategias de EC en las cadenas de suministro. Se observa que en los estudios analizados las principales barreras y dificultades se encuentran en la categoría tecnológica y gubernamentales / regulación, en segundo lugar, las barreras estructurales/ organizacionales, en tercer lugar, las culturales y luego las alianzas estratégicas.

En cuanto a las principales estrategias, la más abordada es la de Reciclaje y estrategias generales de EC., en segundo lugar, la responsabilidad del productor ampliada/ extendida y los movimientos

transfronterizos y en tercer lugar, la logística inversa. Se observa que el diseño para el reciclaje y recuperación están en quinto lugar y no se ve el diseño del producto para alargar vida útil (Figura 16).

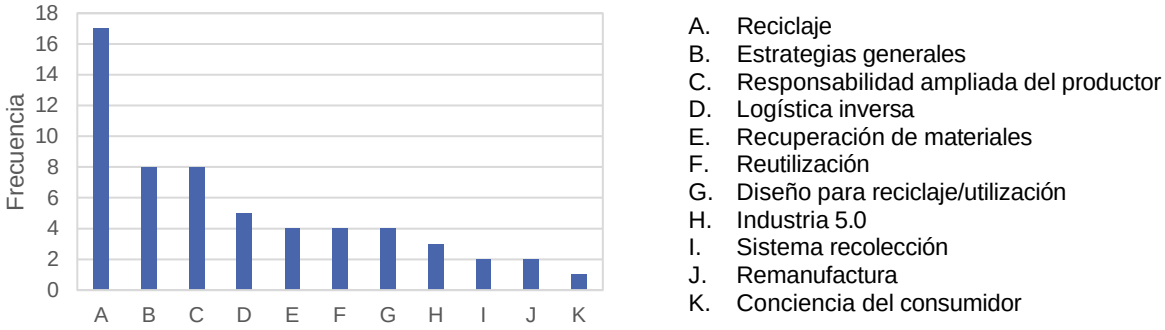



*Figura 16 – Frecuencias en categorías de estrategias de EC. Fuente: Elaboración propia*

Resulta pertinente el análisis de las palabras claves resaltadas por los autores. Se identifican en orden de importancia de acuerdo con la repitencia en los trabajos: *e-waste, circular economy, sustainability, waste management y recycling* (residuos electrónicos, economía circular, sustentabilidad, gestión de residuos y reciclado). Los términos más mencionados en los artículos no incluyen en una frecuencia importante aquellos relacionados con barreras y dificultades para la implementación de la EC. Es especialmente llamativo ya que la misma se construyó con el repositorio seleccionado para el estudio y todos los trabajos incluyen una referencia a las barreras y desafíos en el texto, pero no con la suficiente importancia para constituirse en palabra clave. A su vez, se observa de los resultados obtenidos que casi no hay estudios o artículos científicos publicados en revistas que aborden las barreras y desafíos para la implementación de estrategias de EC en la cadena de suministro de los AEE ni de gestión de RAEE en Países en desarrollo, en particular América latina y Argentina. Esto muestra la necesidad de abordar estas temáticas con calidad científica y motivar a los investigadores a avanzar en la comprensión del tema del estudio.

Así mismo es destacable mencionar que para abordar la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, se requiere ir más allá del simple reciclado (estrategia con mayor frecuencia de abordaje en los estudios analizados) para fomentar una economía circular en la cadena de suministro. Esto implica adoptar enfoques integrales que incluyan el rediseño de productos para prolongar su vida útil, la implementación de sistemas eficientes de recolección y reutilización, y la promoción de prácticas de reparación y remanufactura. Al centrarse en estas estrategias, no solo se minimiza la cantidad de residuos generados, sino que también se optimiza el uso de recursos, se reduce el impacto ambiental y se crea un ciclo sostenible que beneficia a la economía y al medio ambiente.

## 4. CONCLUSIONES.

El objetivo del artículo fue presentar un relevamiento general y sistemático de la literatura sobre posibles barreras para la implementación de estrategias de economía circular en las cadenas de suministro que generan RAEE (excluyendo todos los componentes específicos de energías alternativas).

Para llevar a cabo esta investigación, se formularon una serie de preguntas de investigación y se realizó una búsqueda preliminar no sistemática para identificar palabras clave relevantes. Luego, se ejecutó un análisis bibliométrico en la base de datos Dimensions, y su procesamiento a través de VOSviewer, para la construcción de mapas bibliométricos y el análisis de relaciones entre autores, países e instituciones. La necesidad de dar respuesta a las preguntas de investigación llevó a la necesidad de ampliar la búsqueda a otras bases de datos (Google Scholar, Science Direct, Scielo, Dialnet, Emerald y Engineering Village) Los resultados obtenidos fueron organizados en Microsoft Excel, creando un repositorio de artículos para su análisis.

El sector de aparatos eléctricos y electrónicos enfrenta importantes desafíos en la gestión de residuos, con un panorama mundial que sugiere un crecimiento significativo y limitado progreso hacia un modelo circular. Existe una clara necesidad de abordar de manera integral la gestión de los RAEE y la incorporación de estrategias en la cadena de suministro de las industrias de AEE para fomentar una economía circular. Esto implica no solo desarrollar el reciclado que se evidencia como la estrategia más usada, sino también otras como el rediseño de productos, la implementación de sistemas eficientes de recolección y reutilización, y la promoción de prácticas de reparación y remanufactura.

En cuanto a las principales barreras y dificultades de los estudios abordados, se destacan en primer lugar las tecnológicas y gubernamentales/regulación, en segundo lugar, las barreras estructurales/organizacionales, en tercer lugar, las culturales y, en cuarto lugar, las alianzas estratégicas. Asimismo, son escasos los estudios científicos que abordan las barreras y dificultades a nivel mundial y, en particular, en países en desarrollo como América Latina y Argentina, lo que resalta la necesidad de investigaciones más holísticas y de calidad en estas regiones para comprender y abordar los desafíos específicos que enfrentan en la implementación de estrategias de EC.

Es crucial que futuras investigaciones se centren en desarrollar un entendimiento más profundo de las barreras que enfrentan diferentes regiones y sectores en la implementación de la economía circular. Además, se deben explorar soluciones innovadoras y contextualmente relevantes que puedan ser aplicadas a nivel local, regional y global.

Por último, se destaca la urgencia de una transición hacia una economía circular en las cadenas de suministro de RAEE, sino que también pone de manifiesto la necesidad de políticas públicas robustas, inversiones en tecnología e infraestructura, la implementación de la responsabilidad extendida del productor y la promoción de una cultura de sostenibilidad en todos los actores de la sociedad.

La implementación exitosa de estrategias de EC en este sector dependerá ampliamente del abordaje de las barreras identificadas, pero no sólo contribuirá a la reducción de residuos y la conservación de recursos naturales, sino que también a generar beneficios económicos y sociales, promoviendo un desarrollo más equitativo y sostenible.

## 4. REFERENCIAS.

Afroz, R., Muhibbullah, M., Farhana, P., & Morshed, M. N. (2020). Analyzing the intention of the households to drop off mobile phones to the collection boxes: empirical study in Malaysia. Ecofeminism and Climate Change, 1(1), 3-20. https://doi.org/10.1108/EFCC-03-2020-0004

Ajay P., Struis, R. P. W. J., & Ludwig, C. (2022). Opportunities in Critical Rare Earth Metal Recycling Value Chains for Economic Growth with Sustainable Technological Innovations. Value, 3(2), 1127-1140.

Aminoff, A., & Sundqvist-Andberg, H. (2021). Gestión de la Cadena de Suministro y Responsabilidad Social. Revista de Producción Más Limpia, 322, 1 de noviembre de 2021.

Andersen, T. (2021). A comparative study of national variations of the European WEEE directive: manufacturer's view. Environmental Science and Pollution Research, 29(14), 19920-19939.

Baldé, C. P., Kuehr, R., Yamamoto, T., McDonald, R., D'Angelo, E., Althaf, S., Bel, G., Deubzer, O., Fernandez-Cubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., Khetriwal, D. S., Luda di Cortemiglia, V., Lobuntsova, Y., Nnorom, I., Pralat, N., & Wagner, M. (2024). Global E-waste Monitor 2024. International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). Recuperado de https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/03/GEM_2024_18-03_web_page_per_page_web.pdf

Barouta, D., Alassali, A., Picuno, C., Bruno, M., Syranidou, E., Fiore, S., & Kuchta, K. (2022). E-plastics in a circular economy: A comprehensive regulatory review, Journal of Cleaner Production, 355. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131711.

Berwald, A., Dimitrova, G., Feenstra, T., Onnekink, J., Peters, H., Vyncke, G., & Ragaert, K. (2021). Design for circularity guidelines for the EEE sector. Sustainability, 13(7), 3923. https://doi.org/10.3390/su13073923

Blasenbauer, D., Bogush, A., Carvalho, T. T., Cleall, P., Cormio, C., Guglietta, D., ... & Žibret, G. (2020). Knowledge base to facilitate anthropogenic resource assessment. In Knowledge base to facilitate anthropogenic resource assessment. Technische Universität Wien Research Center for Waste and Resource Management.

Brito, J. L. R. d., Ruiz, M. S., Kniess, C. T., & Santos, M. R. d. (2022). Remanufactura inversa de equipos eléctricos y electrónicos y economía circular. Revista de Gestão, 29(4), 380-394. https://doi.org/10.1108/REGE-02-2020-0011

Blunck, E., Salah, Z., & Kim, J. (2019). Industry 4.0, AI and circular economy – Opportunities and challenges for a sustainable development. Dubrovnik International Economic Meeting – DIEM. https://www.diem-dubrovnik.com/diem/files/2019/Abstracts_DIEM_2019.pdf#page=41

Chaudhary, K., & Vrat, P. (2019). An investigation into consumer behaviour towards e-waste disposal practices in India. Industrial Engineering Journal, 12(1), 14-29.

Cole, C., Gnanapragasam, A., Cooper, T., & Singh, J. (2019). An assessment of achievements of the WEEE Directive in promoting movement up the waste hierarchy: experiences in the UK. Waste Management, 87, 417-427. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.046

do Nascimento, D. E., & De Souza, M. (2020). Barreras y desafíos para el desarrollo de la economía circular: panorama de la producción científica y tecnológica internacional. *Gestión de las Personas y Tecnología*, *13*(39), 93-111

Dwivedi, A., Agrawal, D., & Madaan, J. (2020). Identification and prioritization of issues to implementation of information-facilitated product recovery system for a circular economy. Modern Supply Chain Research and Applications, 2(4), 247-280. https://doi.org/10.1108/MSCRA-12-2019-0023

Ellen MacArthur Foundation. (s/f). Circular economy introduction. Ellen MacArthur Foundation. ttps://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/introduction

Gaines, L., Dai, Q., Vaughey, J. T., & Gillard, S. (2021). I+D de reciclaje directo en el ReCell Center. Recycling, 6(2), 31. https://doi.org/10.3390/recycling6020031

Garrido-Hidalgo, C., Olivares, T., Ramirez, F. J., & Roda-Sanchez, L. (2019). An end-to-end Internet of Things solution for Reverse Supply Chain Management in Industry 4.0. Computers in Industry, 112, 103127. https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103127

Geissdoerfer, M., Savaget P., Bocken, N, Hultink E.,(2017) The Circular Economy – A new sustainability paradigm?, Journal of Cleaner Production, Volume 143, Pages 757-768, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

Gestión Integral de RAEE. (2020). Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, una fuente de trabajo decente para avanzar hacia la economía circular / coordinación general de Laura Maffei. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación; Oficina de País de la Organización Internacional del Trabajo para Argentina, 2020.

Ghisellini, P., Quinto, I., Passaro, R., & Ulgiati, S. (2023). Circular Economy Management of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) in Italian Urban Systems: Comparison and Perspectives. Sustainability, 15, 9054. https://doi.org/10.3390/su15119054

Kannan, G., Asgari, F., Naieni Fard, F. S., & Mina, H. (2024). Application of IoT technology for enhancing the consumer willingness to return E-waste for achieving circular economy: A Lagrangian relaxation approach. Journal of Cleaner Production, 459, 142421. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142421

Hunger, T., Arnold, M., & Ulber, M. (2024). Circular value chain blind spot – A scoping review of the 9R framework in consumption. Journal of Cleaner Production, 440, 140853. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140853

Karpen, I. O., Edvardsson, B., Tronvoll, B., Jaakkola, E., & Conduit, J. (2023). Gestión circular de servicios: hacia la comprensión conceptual y las prioridades de investigación de servicios para un futuro más sostenible. Journal of Service Management, 34(6), 50-69. https://doi.org/10.1108/JOSM-06-2023-0269

Maji, P., & Calvin, S. (2023). Unlocking the supply of e-waste for materials recovery: Regulatory complexity in transboundary movement. MIT Libraries.

Medina-Abad, J., & Freire-Pesántez, A. (2023). Barreras para la implementación de la economía circular en países en vías de desarrollo. Estudios de la Gestión, (14), 101-123. https://doi.org/10.32719/25506641.2023.14.6

Mesjasz-Lech, A. (2023). Can Industry 5.0 be seen as a remedy for the problem of waste in industrial companies? Procedia Computer Science, 225, 1816-1825. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.171

Moyo, T., Sadan, Z., Lotter, A., & Petersen, J. (2022). Barriers to recycling e-waste within a changing legal environment in South Africa. South African Journal of Science, 118(spe), 1-8. https://doi.org/10.17159/sajs.2022/12564

Muhittin, S., Berberoglu, Y., Memis, I., & Yazgan, O. (2021). Sustainable collection center location selection in WEEE management using an integrated MCDM approach. Journal of Cleaner Production, 319, 128560. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128560

Negrete-Cardoso, M., Rosano-Ortega, G., & Álvarez-Aros, E. L. (2022). Estrategia de economía circular y gestión de residuos: un análisis bibliométrico en su contribución al desarrollo sostenible, hacia una era post-COVID-19. Environmental Science and Pollution Research, 29, 61729-61746. https://doi.org/10.1007/s11356-022-18703-3

Obiora, E. (2024). Harnessing the Drivers and Barriers to Implementation of Extended Producer Responsibility for Circular Economy in Nigeria. Circular Economy and Sustainability, 1, 26-10.1

Preciado Ramírez, J. D., Guerrero Freire, E. I., Santana Torres, A. A., & Flores Abarca, L. I. (2023). Circularidad en la cadena de suministro: Transformando la economía a través de la gestión sostenible de recursos. Dominio De Las Ciencias, 9(2), 1710–1732. Recuperado a partir de https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/3371

Rosa, P., Sassanelli, C. , y Terzi , S. (2019).Modelos de negocio circulares versus beneficios circulares: una evaluación en el sector de residuos de equipos eléctricos y electrónicos.Journal of Cleaner Production,231,940–952, doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.310.007/s43615-023-00340-8

Ranta, R., Aarikka-Stenroos, L., Ritala, P., Mäkinen, S.J. (2018) Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy: A cross-regional comparison of China, the US, and Europe, Resources, Conservation and Recycling, Volume 135, Pages 70-82, ISSN 0921-3449, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.017

Rizos, V., & Bryhn, J. (2022). Implementation of circular economy approaches in the electrical and electronic equipment (EEE) sector: Barriers, enablers and policy insights. Journal of Cleaner Production, 338, 130617. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130617

Sahajwalla, V., & Hossain, R. (2023). Replanteamiento de la economía circular para la electrónica, el almacenamiento de energía y la energía solar fotovoltaica con ciclos de vida de productos largos. Boletín MRS, 48, 375-385. https://doi.org/10.1557/s43577-023-00519-2

Sawe, F. B., Kumar, A., Garza-Reyes, J. A., & Agrawal, R. (2021). Assessing people-driven factors for circular economy practices in small and medium-sized enterprise supply chains: Business strategies and environmental perspectives. Business Strategy and the Environment, 30, 2951-2965. https://doi.org/10.1002/bse.2781

STEP Initiative. (2014). Ene Global Definition of E-Waste. Solving the E-Waste Problem (Step) White Paper, UNU 3576 (June), 08.

Tansel, B. (2020). Increasing gaps between materials demand and materials recycling rates: A historical perspective for evolution of consumer products and waste quantities. Journal of Environmental Management, 276, 111196. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111196

Ton. X., Wang, Z., Zhang, B., & Duan, H. (2021). Policy suggestions for improving WEEE management in China based on the Japanese experience. Journal of Cleaner Production, 285, 125329. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125329

Winterstetter, A., Heuss-Assbichler, S., Stegemann, J., Kral, U., Wäger, P., Osmani, M., & Rechberger, H. (2021). The role of anthropogenic resource classification in supporting the transition to a circular economy. Journal of Cleaner Production, 297, 126753. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126753

# ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS CLÁSICO Y EL MÉTODO TAGUCHI PARA EL ROBUSTECIMIENTO DE PROCESOS INDUSTRIALES

Potenzoni Landa, Micaela (1); Pelayo, Marcelo Fabián (2)

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Av. Juan XXIII y Camino de Cintura – Lomas de Zamora (1832). https://ingenieria.unlz.edu.ar/

*(1)* *mica.potenzoni@gmail.com* *(2)* *marcelo_pelayo@yahoo.com.ar*

**RESUMEN**

En el contexto de la mejora continua de procesos productivos en la industria, surge la necesidad de aplicar herramientas estadísticas que permitan reducir la variabilidad y robustecer la calidad sin recurrir a cambios estructurales o grandes inversiones.

El objetivo de la presente investigación consiste, por tanto, en la revisión de la bibliografía existente en materia de Diseño de Experimentos (DOE) clásico y metodología Taguchi, con foco en su aplicabilidad en entornos industriales con recursos limitados y restricciones típicas del sector productivo, con el fin de comprender las diferencias clave entre ambos enfoques: desde la cantidad de ensayos necesarios hasta la sensibilidad frente a la variabilidad no controlable.

Se destaca el método Taguchi por su estructura simple, bajo requerimiento de ensayos y su filosofía centrada en la calidad robusta, lo que lo convierte en una alternativa eficaz para mejorar procesos sin modificar el diseño del producto ni requerir condiciones experimentales ideales. A diferencia del DOE clásico, orientado al modelado preciso de efectos e interacciones mediante análisis estadístico riguroso, el método Taguchi prioriza la identificación de configuraciones de control que minimicen la variación en la salida del proceso, incluso ante perturbaciones externas.

Este análisis comparativo permite clarificar los criterios técnicos que diferencian ambos enfoques y aporta una base metodológica sólida para la selección de herramientas estadísticas en función de los objetivos del proceso, la disponibilidad de recursos y el nivel de robustez requerido.

**Palabras Claves:** Diseño de experimentos, método Taguchi, calidad robusta.

**ABSTRACT**

Continuous improvement efforts in industrial environments require the use of statistical tools capable of reducing process variation and enhancing quality outcomes, while avoiding major infrastructure changes or high-cost implementations.

The main goal of this investigation is to review bibliography about Classical Design of Experiments (DOE) and the Taguchi method, focusing on their applicability in industrial environments with limited resources and typical operational constraints. The aim is to understand the key differences between these approaches, from the number of experimental runs required to their sensitivity to uncontrolled variability.

The Taguchi method stands out for its simple structure, low experimental requirements, and its philosophy centered on robust quality, making it an effective alternative for improving processes without modifying product design or requiring ideal experimental conditions. In contrast to classical DOE, which focuses on precise modeling of effects and interactions through rigorous statistical analysis, the Taguchi approach emphasizes the identification of control parameter settings that minimize output variation, even in the presence of uncontrolled factors.

This comparative analysis clarifies the key technical distinctions between both approaches and provides a solid methodological foundation for selecting statistical tools based on process objectives, resource availability, and the desired level of robustness.

**Keywords:** Design of experiments, Taguchi method, robust quality.

## 1. INTRODUCCIÓN

La calidad se ha consolidado como un factor estratégico en la competitividad de las organizaciones, trascendiendo el enfoque clásico de inspección de productos para convertirse en un elemento integral de los sistemas de gestión. En este contexto, la calidad no se concibe únicamente como el cumplimiento de especificaciones técnicas, sino como la capacidad de los procesos para generar de manera consistente bienes y servicios que satisfagan las expectativas de los clientes y se ajusten a los requerimientos normativos. La evolución histórica de este concepto ha estado fuertemente vinculada con la incorporación de metodologías estadísticas, que han permitido pasar de la detección de defectos hacia su prevención y eliminación en la etapa de diseño y producción.

Dentro de este marco, las herramientas estadísticas de diseño y mejora de procesos han adquirido un rol central, siendo el diseño de experimentos (DOE, Design of Experiments) una de las metodologías más destacadas. El DOE provee un enfoque sistemático para analizar y comprender la relación entre los factores de entrada de un proceso y sus resultados, facilitando la identificación de variables críticas, la optimización de parámetros y la reducción de la variabilidad. A través de esta aproximación, se supera la práctica de ensayos aislados o empíricos, brindando un soporte científico a la toma de decisiones en materia de calidad.

Entre las múltiples propuestas derivadas del DOE, el método Taguchi representa una evolución significativa al introducir el concepto de robustez como eje central de la calidad. Este enfoque busca diseñar productos y procesos que mantengan su desempeño estable frente a condiciones de variabilidad no controlables, priorizando la minimización de pérdidas de calidad desde la perspectiva del cliente y de la sociedad. Así, mientras el DOE tradicional se orienta a la determinación y análisis de factores influyentes, el método Taguchi incorpora una visión más integral, centrada en la tolerancia a la variabilidad y la eficiencia en el diseño experimental.

En virtud de lo expuesto, resulta pertinente realizar un análisis comparativo entre el diseño de experimentos clásico y el método Taguchi, a fin de identificar sus fortalezas, limitaciones y áreas de aplicación, particularmente a partir de la revisión y análisis de bibliografía especializada. Este trabajo busca aportar una visión crítica y fundamentada sobre el uso de ambas metodologías en el campo de la calidad, contribuyendo al debate académico y a la práctica profesional en el ámbito de la ingeniería industrial y de la gestión de procesos.

## 2. CONTENIDO

### 2.1. Diseño de experimentos

El diseño de experimentos (DOE, Design of Experiments) constituye una herramienta metodológica de carácter estadístico esencial en el ámbito de la ingeniería y gestión de la calidad. Su finalidad principal es analizar de manera sistemática la influencia que ejercen múltiples factores de un proceso sobre las características críticas de calidad de un producto o servicio. A diferencia de los enfoques empíricos o basados en el ensayo y error, el DOE proporciona un marco riguroso para la planificación, ejecución y análisis de experimentos, lo cual permite obtener información robusta con un número reducido de ensayos y recursos.

Uno de los principales objetivos del Diseño de Experimentos es determinar los valores óptimos de los factores que permitan reducir o controlar la variabilidad de los productos o procesos. Los datos obtenidos de un experimento aleatorio están influidos por tres tipos de variabilidad:

- **Variabilidad sistemática:** es la variabilidad originada por diferencias en las condiciones de experimentación. Esta variación está impuesta por el experimentador en el diseño del experimento, produciendo que los datos obtenidos se agrupen en categorías (clusters) cuando su influencia es importante. Esta variabilidad debe ser tenida en cuenta en el modelo para poder estimar su influencia en la variable respuesta.
- **Variabilidad propia del proceso o del producto:** es la variabilidad producida por los llamados “factores de ruido”, estos factores no son controlables, son impredecibles y no pueden erradicarse en su totalidad. Provocan que, por ejemplo, observaciones repetidas de un mismo fenómeno tengan diferencias. Estas medidas, si bien no van a ser todas iguales responderán a una ley, de forma tal que se agruparán en torno a un valor central siguiendo algún modelo de probabilidad teórico. Esta variabilidad puede ser estimada si la experimentación está bien planificada. Siempre está presente y se espera que sus valores sean tolerables.

- **Variabilidad sistemática y no planificada:** Esta variabilidad produce una variación sistemática en los resultados y se debe a causas desconocidas y no planificadas, es decir, los resultados están siendo sesgados sistemáticamente por causas desconocidas. La presencia de esta variabilidad supone la principal causa de conclusiones erróneas y estudios incorrectos al ajustar el modelo estadístico. Existen dos estrategias básicas para tratar de evitar la presencia de este tipo de variabilidad: la aleatorización y la técnica de bloques.

La experimentación es una práctica usual en la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, donde los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente y estimar dicha influencia y para conseguir esta información es necesario experimentar, es decir, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable respuesta y con el análisis y estudio de la información obtenida se elaboran las conclusiones.

La metodología tradicional de experimentación se basa en la variación de un solo factor por vez. Es decir, partiendo de una condición inicial, se modifica únicamente el valor de un factor mientras los restantes se mantienen constantes. De esta manera, cualquier cambio en la variable de respuesta se atribuye exclusivamente a la variación del factor en estudio, lo que permite estimar su efecto individual. Posteriormente, el procedimiento se repite para los demás factores. El razonamiento que sustenta esta técnica establece que, si se modificaran dos o más factores de manera simultánea entre dos experimentos consecutivos, no sería posible determinar si el cambio en la respuesta se debe a uno de los factores en particular, al otro, o a la interacción entre ambos.

No obstante, este enfoque presenta limitaciones relevantes, entre ellas:

- Para obtener resultados consistentes es necesario realizar un número elevado de pruebas.
- Las conclusiones alcanzadas tras el análisis de cada factor resultan parciales y limitadas.
- No es factible identificar ni analizar interacciones entre factores.
- En muchos casos, la aplicación práctica se ve restringida por los costos y el tiempo que demanda su implementación.

Estas limitaciones se hacen especialmente evidentes cuando existe interacción entre factores. En tales circunstancias, la experimentación tradicional no permite estimar de qué manera interactúan los factores entre sí ni cómo esta interacción impacta en la variable de respuesta, restringiendo la información obtenida únicamente a los efectos principales.

Adicionalmente, este método carece de mecanismos para identificar el valor óptimo de la variable de respuesta. El experimentador suele asumir que se ha alcanzado dicho óptimo cuando, al modificar los niveles de los factores, no se observan mejoras en la variable de interés. Sin embargo, esta aproximación basada en el procedimiento de “prueba y error” puede conducir a conclusiones erróneas, alejadas del verdadero valor buscado, además de requerir un número considerable de ensayos que incrementan los costos y el tiempo de experimentación.

En síntesis, el inconveniente principal de la experimentación radica en que solo se modifica un factor por vez. La alternativa se encuentra en la variación simultánea de más de un factor, lo que permite obtener información tanto de los efectos principales como de las interacciones entre ellos. El desafío consiste en diseñar un plan de experimentación con una cantidad limitada de ensayos, que sean complementarios entre sí y que, a partir de la combinación de resultados, permitan generar el conocimiento requerido de manera eficiente.

### 2.1.1 Diseño de experimentos factorial

El Diseño Estadístico de Experimentos ofrece un conjunto amplio de metodologías orientadas a obtener información confiable y significativa sobre los procesos analizados. Dentro de este conjunto, una de las técnicas más relevantes es el Diseño Factorial, especialmente útil cuando el propósito del estudio es evaluar cómo una variable de respuesta se ve influida no solo por el efecto individual de dos o más factores, sino también por las interacciones que pueden existir entre ellos.

En la práctica de la investigación se utilizan diversos tipos de diseño factorial, cuya elección depende de los objetivos del estudio y de los recursos disponibles. Entre ellos, uno de los casos más relevantes ocurre cuando se consideran k factores, cada uno con dos niveles. Estos factores pueden ser cuantitativos (por ejemplo, temperatura, presión o tiempo) o cualitativos (como el tipo de material o

método de operación). En ambos casos, los dos niveles se definen habitualmente como “superior” e “inferior”.

Cuando se construye un diseño completo bajo estas condiciones, es necesario evaluar todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores, lo que equivale a $2^k$ ensayos. A este esquema se lo denomina Diseño Factorial $2^k$. Su principal ventaja radica en que permite analizar de manera simultánea tanto los efectos principales de cada factor como las interacciones que surgen entre ellos, lo que otorga una visión integral del fenómeno en estudio.

El principio de este tipo de diseño se basa en variar de forma conjunta los niveles de los factores, en lugar de hacerlo uno por vez. Gracias a ello, se evita la realización de experimentos redundantes, ya que los factores no están correlacionados. Como consecuencia, se logra una disminución significativa en el costo y en el tiempo de experimentación. Además, la información final no se obtiene de cada ensayo de manera aislada, sino de la combinación y análisis conjunto de todas las respuestas generadas.

Por otra parte, si en lugar de asignar dos niveles a los factores se establecen tres, el diseño resultante se conoce como Diseño Factorial $3^k$. Este permite profundizar el estudio al ofrecer una mayor cantidad de combinaciones y, en consecuencia, una caracterización más detallada de los efectos e interacciones que influyen en la variable de respuesta.

En un Diseño de Experimentos se pueden observar dos tipos de efectos:

- **Efecto principal:** es el cambio promedio en la variable respuesta cuando el factor se cambia a los distintos niveles.
- **Efecto de interacción:** es el cambio en la respuesta entre los niveles de un factor para los distintos niveles de algunos factores, promediado sobre los niveles de los factores restantes.

Si se tiene dos factores A y B con niveles a y b respectivamente, con a-b condiciones experimentales (tratamientos) correspondientes a todas las combinaciones posibles de niveles de los dos factores. Para obtener información del error experimental es necesario repetir el conjunto completo de condiciones experimentales r veces (réplicas), siempre con un orden aleatorio de aplicación de las condiciones en cada repetición.

La aplicación del Diseño experimental presenta varias ventajas tales como, eficiencia, ya que la aplicación del Diseño experimental produce ahorro y economía del recurso experimental, así como también mejoras en la inferencia de los resultados. Asimismo, todos los datos son usados para obtener la información deseada y al utilizar esta aplicación puede medirse el efecto de interacción entre los factores.

Por otro lado, dentro de las principales desventajas del método, se destaca que debido a que es necesario la replicación de los experimentos a fin de obtener la estimación del error se incrementa el número de unidades experimentales necesarias para llevar a cabo una realización completa de un diseño factorial y también que al aumentarse el número de niveles de algunos factores o bien el número de factores ser muy numerosos, puede hacerse difícil la detección de efectos significativos en el experimento, dado que la variabilidad puede verse incrementada.

Para poder aplicar el diseño factorial se deben verificar los siguientes supuestos teóricos:

- La variable respuesta debe seguir aproximadamente a una distribución normal.
- Los factores son fijos. Todos los factores que intervienen en el análisis se consideran fijos y los efectos de los tratamientos se definen como desviaciones de la media general.
- Los diseños son completamente aleatorios. Los experimentos se deben realizar en un orden aleatorio para evitar que el efecto de un factor esté “confundido” con el de otro factor no intencionado y se introduzcan sesgo en los valores de los efectos.

Un Diseño de Experimentos trata de realizar en forma organizada un plan de experimentación, es decir, de entre todos los ensayos que constituyen el dominio experimental (conjunto de todos los posibles resultados en la combinación de valores que pueden asumir los factores) cuáles son los que se llevarán a cabo para obtener la información requerida. La experimentación más económica es aquella en la que los factores asumen únicamente dos posibles valores (niveles), y la que proporcionará la información con menor incertidumbre es aquella en la que dichos valores son los extremos del dominio experimental, notándose con –1 el nivel inferior y +1 el nivel superior del factor.

Para reflejar la manera en la que se desarrollan los ensayos se utiliza una matriz de experimentos, a continuación, se detalla cómo se vería reflejada para el caso más sencillo de Diseño de Experimentos, es el caso del experimento factorial $2^2$:

*Tabla 1 Matriz de experimentos $2^2$*

| Ensayo | Factor A | Factor B | Tratamiento |
|---|---|---|---|
| 1 | -1 | -1 | 1 |
| 2 | +1 | -1 | a |
| 3 | -1 | +1 | b |
| 4 | +1 | +1 | ab |

Este diseño se denomina Factorial Completo, ya que todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores pueden ser evaluadas. Es decir, en el primer ensayo se considera los factores A y B a sus niveles más bajos, el ensayo dos tiene al factor A con el nivel más alto y el factor B a su nivel más bajo, el ensayo tres al factor A en un nivel bajo y el factor B a nivel alto, y por último el ensayo cuatro presenta a ambos factores a nivel alto. Los tratamientos reciben el nombre de:

1: ambos factores en el nivel más bajo

a: el factor A en el nivel más alto y el factor B en el nivel más bajo

b: el factor A en el nivel más bajo y B en el más alto

ab: ambos factores en el nivel más alto

### 2.1.2 Diseño factorial fraccionado

La principal limitación del diseño factorial completo radica en su carácter exponencial: a medida que el número de factores aumenta, el número de combinaciones experimentales crece rápidamente ($2^k$). Esto puede resultar en un elevado consumo de recursos, tiempo y esfuerzo experimental.

Para mitigar esta problemática, se recurre a los diseños factoriales fraccionados, los cuales constituyen una estrategia eficiente para reducir el número de ensayos experimentales manteniendo una capacidad razonable de análisis.

El diseño factorial fraccionado consiste en seleccionar una fracción del diseño factorial completo, de manera sistemática y planificada, manteniendo la posibilidad de obtener información valiosa sobre el sistema.

Se representa como $2^{k-p}$, donde:

k: número de factores,

p: número de fracciones que se descartan,

$2^{k-p}$: número de corridas seleccionadas.

La reducción de experimentos se logra mediante el uso de generadores que definen la relación entre los factores y permiten seleccionar únicamente las combinaciones necesarias.

Los resultados experimentales del Diseño de Experimentos se evalúan a través del Análisis de la Varianza.

### 2.1.3 Aplicación de ANOVA en el diseño de experimentos

El Análisis de Varianza (ANOVA) es una de las técnicas estadísticas más sólidas y de uso extendido dentro del diseño de experimentos. Su finalidad es establecer si los factores evaluados, así como las interacciones entre ellos, ejercen un efecto significativo desde el punto de vista estadístico sobre una variable de respuesta continua. De esta forma, ANOVA no solo permite identificar las fuentes de variabilidad de un proceso, sino también orientar la optimización de sus parámetros, favoreciendo la estabilidad, el mejor desempeño y la reducción de la variación indeseada.

El procedimiento de análisis con ANOVA se desarrolla a través de distintas etapas, que pueden describirse de la siguiente manera:

**1. Definición del diseño experimental**

El proceso se inicia con la planificación del experimento. En esta instancia, se selecciona la variable de respuesta (por ejemplo, tiempo de ciclo, resistencia mecánica o rendimiento) y se identifican los factores que potencialmente la afectan. A cada factor se le asignan distintos niveles o condiciones de prueba. La estructura del diseño puede ser factorial completo, fraccionado o de tipo ortogonal (como los propuestos por Taguchi), dependiendo del número de factores y niveles a estudiar. El propósito de esta etapa es garantizar que el diseño permita evaluar tanto los efectos principales como las interacciones.

**2. Ejecución de los ensayos**

Una vez definido el diseño, se llevan a cabo las pruebas correspondientes a cada combinación de niveles. En cada corrida experimental se mide la variable de respuesta. Siempre que es posible, se incluyen réplicas con el fin de estimar la variabilidad inherente al proceso y calcular el error experimental.

**3. Cálculo de estadísticas descriptivas iniciales**

Finalizada la recolección de datos, se procede al cálculo de indicadores básicos, tales como la media global de las respuestas y la suma de cuadrados total (SST), que refleja la dispersión general de los datos respecto a la media. Este valor constituye el punto de partida para dividir la variabilidad en componentes atribuibles a los factores y al error aleatorio:

$$SST = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2 \quad (1)$$

Donde $y_i$ es cada observación individual y $\bar{y}$ es la media global.

**4. Descomposición de la variabilidad**

La variación total se reparte entre las diferentes fuentes: cada factor principal, las posibles interacciones y el error residual. Por ejemplo, en un diseño factorial con dos factores A y B, la relación se expresa como:

$$SST = SSA + SSB + SSAB + SSE \quad (2)$$

donde:

- SSA y SSB representan la variabilidad atribuida a los factores A y B, respectivamente.
- SSAB corresponde a la variabilidad atribuida a la interacción entre A y B.
- SSE representa la variabilidad residual o error experimental no explicada por el modelo.

**5. Cálculo de las medias cuadráticas y prueba F**

Una vez descompuesta la suma de cuadrados total (SST) en sus componentes (suma de cuadrados por factor, por interacción y por error), el siguiente paso en el análisis ANOVA consiste en calcular las medias cuadráticas (Mean Squares, MS). Estas se obtienen dividiendo cada suma de cuadrados entre sus respectivos grados de libertad (df).

**Medias cuadráticas**

Cada suma de cuadrados se divide entre sus grados de libertad correspondientes para obtener las medias cuadráticas (MS), que son estimaciones de la varianza asociada a cada fuente de variación. Matemáticamente:

$$MS_A = \frac{SS_A}{df_A} \; ; \; MS_E = \frac{SS_E}{df_E} \quad (3)$$

Donde $df_A$ es el número de grados de libertad del factor A y $df_E$ los del error experimental.

El estadístico F se obtiene como la razón entre la media cuadrática de un factor y la media cuadrática del error:

$$F = \frac{MS_{factor}}{MS_{error}} \quad (4)$$

Un valor de F considerablemente mayor que 1 sugiere que el factor tiene un impacto significativo sobre la variable de respuesta.

Finalmente, el valor de F calculado se contrasta con el valor crítico de la distribución F de Fisher-Snedecor, considerando los grados de libertad del numerador (factor) y del denominador (error), y un nivel de significancia usualmente fijado en $\alpha = 0{,}05$.

De manera alternativa, puede calcularse el $p_{valor}$, que expresa la probabilidad de obtener un valor de F igual o superior al observado si el factor no tuviera efecto. La decisión se interpreta bajo el siguiente criterio:

- Si $p \leq 0{,}05$, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que el factor tiene un efecto significativo.
- Si $p > 0{,}05$, no existe evidencia estadística suficiente para afirmar que el factor ejerza influencia sobre la respuesta.

Todos estos cálculos suelen resumirse en una tabla ANOVA, como la siguiente:

*Tabla 2 Tabla ANOVA para Diseño de Experimentos*

| **Fuente de variación** | **Suma de cuadrados (SS)** | **Grados de libertad (df)** | **Media cuadrática (MS)** | **F** | **$p_{valor}$** |
|---|---|---|---|---|---|
| Factor A | $SS_A$ | $df_A$ | $MS_A = SS_A/df_A$ | $F_A = MS_A/MS_E$ | $p_A$ |
| Error | $SS_E$ | $df_E$ | $MS_E = SS_E/df_E$ | | |
| **Total** | **$SS_T$** | **$df_T$** | | | |

### 6. Interpretación y análisis de resultados

ANOVA proporciona el sustento estadístico necesario para determinar si las diferencias observadas entre los niveles de un factor responden a causas reales o son atribuibles al azar. En el contexto del diseño de experimentos orientado a la calidad, este análisis permite establecer prioridades y justificar de manera objetiva las decisiones de mejora. Entre los resultados más relevantes de la interpretación se destacan:

- La identificación de los factores que ejercen influencia significativa sobre la variable de respuesta.
- La estimación de la contribución porcentual de cada factor a la variabilidad total, calculada como:

$$\%\ Contribución = \frac{SS_{factor}}{SS_{total}} x100 \qquad (5)$$

- La detección de interacciones relevantes, cuyo efecto combinado no puede explicarse por la acción independiente de los factores.

### 7. Aplicación en la toma de decisiones

Los hallazgos obtenidos permiten reconocer los factores críticos del proceso y seleccionar los niveles de operación que maximizan la eficiencia, la calidad o la estabilidad del sistema. En consecuencia, la aplicación de ANOVA dentro del diseño de experimentos se traduce en beneficios tangibles, tales como la mejora del rendimiento, la reducción de costos, el aumento de la robustez del producto y la disminución de la variabilidad del proceso.

## 2.2. Método Taguchi

### 2.2.1 Genichi Taguchi

Genichi Taguchi (1924–2012) fue un ingeniero y estadístico japonés reconocido internacionalmente por sus aportes a la gestión y la ingeniería de calidad. Se formó como ingeniero mecánico en la Universidad de Kiryu y obtuvo en 1962 el doctorado en Ciencias en la Universidad de Kyushu, especializado en estadística y matemáticas.

Su interés por el diseño de experimentos comenzó en 1948, cuando trabajó en el Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social de Japón bajo la influencia del estadístico Matosaburo Masuyama, y en paralelo colaboró en el Instituto de Estadística Matemática y en la producción farmacéutica de penicilina.

En 1950 ingresó al Electrical Communication Laboratory (ECL) de Nippon Telegraph and Telephone Corporation, donde adquirió reconocimiento por sus aportes al desarrollo de sistemas de comunicación y su vinculación con empresas como Toyota, Ford, Xerox y Bell Labs. En este período coincidió con el auge de la gestión de la calidad impulsado por Edward Deming.

A partir de 1962, ya doctorado, se independizó como consultor y comenzó a difundir sus métodos en distintos países, alcanzando prestigio mundial. Su legado se centra en el desarrollo de técnicas innovadoras para el diseño robusto de productos y procesos, las cuales transformaron la manera en que la industria aborda la calidad y la mejora continua.

### 2.2.2 Definición de calidad según Genichi Taguchi

En general, las definiciones de calidad pueden dividirse en dos categorías. Una de ellas pone el énfasis en el cumplimiento de las especificaciones de los productos o servicios; a este grupo pertenecen las definiciones de Crosby (1979), Juran (2005) y Shewhart (1980). En la otra categoría se encuentran aquellas definiciones que basan la calidad en la satisfacción del cliente, independientemente del cumplimiento de los estándares de calidad fijados. Demming (2000), Feigenbaum (1967) e Ishikawa (1986) son los principales defensores de esta teoría.

El ingeniero japonés Genichi Taguchi planteó una visión completamente innovadora del concepto de calidad. Según Taguchi, la calidad es la pérdida que un producto causa a la sociedad después de haber sido entregado. Esta definición es la primera que considera a la calidad como una pérdida, la que puede ser ocasionada tanto por las desviaciones en la característica de calidad como por los efectos secundarios del producto. A partir de esta manera de entender la calidad, Taguchi diseñó y aplicó un conjunto de métodos que permiten a las organizaciones mejorar sus estándares de calidad.

El trabajo de Taguchi ha tenido un impacto en la industria y la gestión de calidad. Su enfoque en el diseño robusto y la minimización de la variabilidad ha sido adoptado por numerosas empresas en todo el mundo. Muchas organizaciones han implementado las metodologías de Taguchi para mejorar la calidad de sus productos y procesos, lo que ha llevado a mejoras significativas en la satisfacción del cliente y la eficiencia operativa.

La visión de Taguchi se manifiesta en sus contribuciones más reconocidas a la mejora de la calidad, entre las que se destacan: la Función Pérdida de Calidad, la incorporación de las matrices ortogonales en la implementación del Diseño de Experimentos, el índice de Señal / Ruido y el índice de Capacidad de Procesos

### 2.2.3 Contribución de Genichi Taguchi al Diseño de Experimentos – Método Taguchi

Un aporte relevante de Taguchi al Diseño de Experimentos consistió en extender de manera práctica su aplicación al ámbito de la industria, simplificando considerablemente su complejidad. Recién en la década del 80 se hizo conocido el trabajo que al respecto Taguchi venía desarrollando en Japón desde mucho tiempo atrás. A partir de ello se dio un amplio debate sobre la eficiencia de su método y la comparación con el diseño clásico desarrollado por Fisher. Indirectamente esta discusión contribuyó a la difusión del Diseño de Experimentos y especialmente del método de Taguchi, ya que éste, a diferencia de lo que ocurre con el diseño clásico, no requiere ser un experto en el método para estar en condiciones de aplicarlo.

Taguchi innovó y simplificó el Diseño de Experimentos con la introducción de las tablas conocidas como matrices ortogonales, que son una modificación de las matrices de Hadamard (matrices ortogonales nxn). A través de una matriz ortogonal se determina de una manera estandarizada la combinación de los niveles de los factores que se probarán en cada ensayo.

Las matrices ortogonales fueron el principal aporte de Taguchi en el Diseño de Experimentos, estas estas son estructuras experimentales predefinidas que permiten examinar hasta un total de n-1 factores, siempre y cuando no se consideren las interacciones entre los mismos. Facilitan y, en algunos casos, reducen gran parte del esfuerzo del diseño experimental porque posibilitan evaluar simultáneamente numerosos factores con un número mínimo de ensayos, permitiendo así una disminución en los recursos necesarios para la experimentación.

Esta matriz permite examinar simultáneamente muchos factores realizando pocos ensayos lo que implica una disminución en los costos de experimentación por parte la Organización. Para realizar el Diseño de Experimentos el Dr. Taguchi utiliza las matrices de Hadamard.

### 2.2.4 Matrices de Hadamard

Las matrices de Hadamard son un tipo específico de matriz matemática ortogonal, es decir, tienen propiedades que permiten separar los efectos de distintos factores sin que se confundan entre sí.

Estas matrices:

- Son cuadradas (n×n),
- Tienen valores de 1 y -1,
- Cumplen que el producto escalar entre cualquier par de columnas da cero, lo cual significa que los factores son ortogonales (independientes en términos estadísticos).

Taguchi adaptó esta idea a matrices de diseño experimental, donde generalmente se usan valores 1 y 2 (o "bajo" y "alto"), y a veces se reemplaza el "2" por "-1" para hacer análisis más técnicos (como calcular interacciones o relaciones con álgebra lineal).

Una matriz de Hadamard de tamaño n×n tiene capacidad para estudiar hasta n−1 factores distintos (las columnas menos una) si no se considera el análisis de interacciones entre ellos.

Por ejemplo, con una matriz de 8x8 (como la L8 en Taguchi), podrías estudiar hasta 7 factores principales. Pero si quisieras estudiar interacciones entre factores (por ejemplo, cómo A y B juntos afectan una respuesta), necesitarías más corridas o matrices específicas que las contemplen.

Taguchi usa matrices ortogonales, derivadas del concepto de matrices de Hadamard, para distribuir los niveles de los factores de forma que no se solapen sus efectos. Esto permite realizar menos experimentos, pero aun así obtener información clara sobre los efectos principales de cada factor. Utilizando estas matrices, es posible estudiar muchos factores a la vez (hasta n - 1 en una matriz de tamaño n), pero esto sacrifica el análisis de interacciones, a menos que se diseñe específicamente para incluirlas.

El análisis de matrices ortogonales de Taguchi es usado para determinar el mejor nivel de los parámetros de manera tal que el resultado sea óptimo, permitiendo obtener procesos más robustos con el mínimo número de ensayos.

De acuerdo al número de niveles que tengan los factores, las matrices ortogonales se dividen en la serie $2^n$ y en la serie $3^n$. Las matrices ortogonales más utilizadas son L(4), L(8), L(16), L(32) y L(64) para los de la serie $2^n$, y L(9) y L(27) para la serie 3n.

En la matriz L(4) se pueden evaluar dos factores con su correspondiente interacción (diseño saturado) o tres factores sin interacciones. En una matriz L(8), tres factores (diseño saturado) y hasta un máximo de siete factores sin evaluar interacciones.

Un ejemplo de matriz ortogonal L(4) para dos factores a dos niveles con interacciones o tres factores a dos niveles sin interacciones, es el siguiente:

*Tabla 2 Matriz ortogonal L4*

| **Ensayo** | **Factor A** | **Factor B** | **Interacción AB / Factor C** |
|---|---|---|---|
| Ensayo 1 | -1 | -1 | 1 |
| Ensayo 2 | -1 | 1 | -1 |
| Ensayo 3 | 1 | -1 | -1 |
| Ensayo 4 | 1 | 1 | 1 |

Si consideramos dos factores, A y B, con nivel -1: bajo y nivel 1: alto, la matriz ortogonal determina la manera ordenada de realizar los ensayos:

Ensayo 1: A Bajo, B Bajo

Ensayo 2: A Bajo, B Alto

Ensayo 3: A Alto, B Bajo

Ensayo 4: A Alto, B Alto

En el caso de tener tres factores: A, B y C:

Ensayo 1: A Bajo, B Bajo, C Alto

Ensayo 2: A Bajo, B Alto, C Bajo

Ensayo 3: A Alto, B Bajo, C Bajo

Ensayo 4: A Alto, B Alto, C Alto

Con estas cuatro experiencias se evaluarán los efectos principales de los factores, no pudiéndose evaluar las interacciones correspondientes.

Para evaluar la influencia de los factores sobre una característica de calidad (variable respuesta) resulta necesario comparar los valores obtenidos en los distintos niveles de dichos factores. Estas comparaciones permiten identificar cuáles ejercen mayor impacto en la respuesta y cuál es el nivel más conveniente de cada uno. Por ello, al momento de diseñar un experimento es fundamental determinar con precisión cuántas comparaciones son estrictamente necesarias, evitando redundancias. Esta decisión conduce a la selección adecuada de la matriz ortogonal que servirá de base para el análisis.

El método de Taguchi presenta ventajas operativas frente al diseño de experimentos clásico. En primer lugar, los esquemas con factores de dos, tres niveles o diseños mixtos se analizan bajo un mismo enfoque, lo que simplifica su aplicación. En segundo lugar, únicamente se consideran en el modelo aquellas interacciones que, según la experiencia de los especialistas, podrían influir en la variable de respuesta. Esto da lugar a un diseño confundido que reduce de manera significativa el número de ensayos requeridos.

Esta forma de abordar las interacciones se sustenta en una diferencia conceptual clave: mientras que Taguchi parte del supuesto de que quienes aplican el diseño poseen conocimiento práctico del problema, el enfoque clásico asume la ausencia de dicho conocimiento. Aunque dentro del diseño clásico es posible disminuir el número de ensayos mediante el uso de factoriales fraccionados, su construcción exige definir generadores independientes y aplicar técnicas estadísticas avanzadas, lo que dificulta su implementación en comparación con la propuesta de Taguchi.

### 2.2.4 Aplicación de ANOVA en el método Taguchi y diferencias con el diseño de experimentos

Como se mencionó previamente, el análisis de varianza (ANOVA) es una herramienta estadística fundamental en el diseño de experimentos, ya que permite evaluar la significancia de los efectos de distintos factores sobre una variable de respuesta. Su aplicación, tanto en diseños factoriales fraccionados como en el método Taguchi, se basa en descomponer la variabilidad total en componentes atribuibles a factores principales, interacciones y error experimental, con el fin de identificar cuáles influyen de manera significativa en el sistema.

En ambos enfoques, el procedimiento técnico es similar: cálculo de sumas de cuadrados, grados de libertad, medias cuadráticas y estadísticos F. Sin embargo, el método Taguchi introduce particularidades relevantes. Una de ellas es el uso de matrices ortogonales estándar (L4, L8, L16, L32, etc.), que permiten analizar múltiples factores con pocos experimentos y garantizan la estimación independiente de los efectos principales. A diferencia del diseño clásico, en Taguchi solo se consideran interacciones específicas cuando se planifican expresamente.

Otra diferencia importante está en la estimación del error experimental. Mientras que en los diseños factoriales fraccionados suele recurrirse a réplicas, en Taguchi se asume con frecuencia que los efectos menores representan variabilidad aleatoria, utilizándolos para estimar el error de manera indirecta. Además, este enfoque incorpora el índice señal/ruido (S/N), que combina la media y la dispersión en una métrica única, ajustada a la naturaleza de la característica de calidad (“mayor es mejor”, “menor es mejor” o “nominal es mejor”).

En síntesis, aunque el procedimiento de ANOVA es conceptualmente el mismo, su aplicación en el método Taguchi se distingue por el uso de matrices ortogonales, la ausencia frecuente de réplicas y la introducción del índice S/N. Estas adaptaciones permiten aumentar la eficiencia experimental y, al mismo tiempo, garantizar la validez estadística en el análisis de procesos y productos.

### 2.3. Análisis de resultados

A partir de los expuesto anteriormente, se observa que ambos métodos comparten fundamentos estadísticos comunes, como la aplicación del análisis de varianza (ANOVA) y el uso de esquemas factoriales para la recolección de datos experimentales, sin embargo, existen diferencias conceptuales y metodológicas significativas que es necesario considerar:

*Tabla 4 Tabla comparativa entre métodos*

| Criterio | Método Taguchi | Diseño de Experimentos (DOE) Tradicional |
|---|---|---|
| **Objetivo principal** | Optimizar el desempeño y minimizar la variabilidad (calidad robusta). | Determinar efectos principales e interacciones entre factores. |
| **Filosofía** | Prevención de la variabilidad, diseño robusto ante condiciones no controladas. | Precisión estadística y análisis detallado de causas de variación. |
| **Diseño experimental** | Usa matrices ortogonales prediseñadas (L4, L8, L16, etc.). | Usa diseños completamente o fraccionalmente factoriales ($2^k$, $2^{(k-p)}$). |
| **Número de ensayos** | Bajo (eficiente incluso con muchos factores). | Puede ser alto (crece exponencialmente con el número de factores). |
| **Análisis estadístico** | Sencillo (ANOVA simplificado) | Complejo (requiere estimación precisa del error con réplicas). |
| **Tratamiento del error** | No requiere réplicas (estima error con efectos no significativos). | Estima el error con repeticiones o errores aleatorios controlados. |
| **Análisis de interacciones** | Limitado (puede analizar algunas interacciones planificadas). | Completo (permite análisis de múltiples órdenes de interacción). |
| **Indicador de desempeño** | Índice señal/ruido (S/N), que combina media y variabilidad. | Promedios y desviaciones estándar analizadas por separado. |
| **Aplicabilidad** | Ideal para entornos industriales con pocos recursos y necesidad de robustez. | Ideal para investigación o análisis detallado con recursos adecuados. |

En base a lo analizado, se puede concluir que el diseño de experimentos clásico ofrece mayor precisión estadística y flexibilidad analítica, permitiendo un estudio detallado de los efectos principales y de interacciones de orden superior. Esta rigurosidad requiere más ensayos, conocimientos estadísticos avanzados y recursos adicionales, por lo que resulta recomendable cuando el tiempo y los medios para la experimentación son suficientes.

Por su parte, el método Taguchi destaca por su simplicidad, eficiencia y enfoque en la robustez, lo que lo convierte en una alternativa particularmente útil en entornos industriales con recursos limitados y donde se busca un desempeño consistente frente a la variabilidad externa. Su uso de matrices ortogonales prediseñadas y del índice señal/ruido permite evaluar múltiples factores de manera económica, aunque con ciertas limitaciones para analizar interacciones complejas.

## 3. CONCLUSIONES

El análisis comparativo desarrollado a partir de la bibliografía permitió delimitar con claridad los criterios técnicos que distinguen al método Taguchi del diseño de experimentos clásico, aportando un marco metodológico sólido para la elección de herramientas estadísticas según los objetivos del proceso, la disponibilidad de recursos y el nivel de robustez requerido. Dentro de este contexto, el método Taguchi se presenta como la opción más adecuada para aplicaciones industriales, ya que posibilita obtener resultados consistentes con un número limitado de ensayos, reduciendo así costos, tiempos y la necesidad de personal altamente especializado.

Al mismo tiempo, su énfasis en la robustez contribuye a generar productos y procesos menos vulnerables frente a variaciones externas, una ventaja decisiva en entornos industriales donde las condiciones no siempre pueden controlarse de manera estricta. Estas características refuerzan su valor como alternativa práctica y efectiva para organizaciones que buscan fortalecer la calidad y la estabilidad de sus procesos productivos bajo restricciones reales de recursos.

## 4. REFERENCIAS


[1] Taguchi, G. (2005). Taguchi's quality engineering handbook. Springer.

[2] Wu, Y., & Wu, A. (1997). Diseño robusto utilizando los métodos de Taguchi. [Editorial/Publisher si se conoce].

[3] Barker, T. (1986). Quality engineering by design: Taguchi's philosophy. Quality Process.

[4] Ross, P. (1988). Taguchi techniques for quality engineering. New York: McGraw-Hill.

[5] Roy, R. (1990). A primer on the Taguchi method. USA: Society of Manufacturing Engineers.

[6] Peace, G. (1993). Taguchi methods: A hands-on approach. USA: Addison-Wesley.

[7] Grove, D. M., & Davis, T. P. (1991). Taguchi's idle column method. Technometrics, 33(3), 293–299.

[8] Mascó, R. (1996). Manual para la aplicación del método de Taguchi en la ingeniería de calidad y el diseño de experimentos industriales. Rosario, Argentina: UNR Editora.

[9] Vijayan, N. N. (1992). Taguchi parameter design: A panel discussion. Technometrics, 34(2), 127–161.

[10] Montgomery, D. C. (2006). Design and analysis of experiments (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.

[11] Altan, M. (2009). Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi, ANOVA and neural network methods. Materials & Design, 31, 599–604.

[12] Hernández, A. (2012). Aplicación del diseño de experimentos, método Taguchi, a un proceso de digestión anaeróbica [Tesis, universidad o editorial si aplica].

[13] Hernández, A., & De La Paz Guillón, M. (2015). La metodología de Taguchi en el control estadístico de la calidad. Revista Investigación Operativa, 23(37), 65–83.

[14] Jones, B., & Montgomery, D. C. (2020). Design of experiments: A modern approach. Wiley.

[15] Antony, J. (2023). Design of experiments for engineers and scientists (3rd ed.). Elsevier.

[16] Shina, S. (2022). Industrial design of experiments: A case study approach for design and process optimization. Springer.

[17] Venkateshan, S. P. (2021). Design of experiments. In Mechanical measurements.

[18] Beg, S. (Ed.). (2021). Design of experiments for pharmaceutical product development: Volume II – Applications and practical case studies. Springer.

[19] Vazquez, A. R., & Xuan, X. (2024). A review of design of experiments courses offered to undergraduate students at American universities. The American Statistician.

[20] Armiento, F., Bertoglio, C., Borra, C., Boychenko, D., Cruz, L., Kaimakamian, E., Lobo Mirassón, U., Lobo Mirassón, Y., Moralli, G., Pelayo, M., Potenzoni, M., Serra, D., & Stutz, C. (2024). Ingeniería de la calidad (1.ª ed.). Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

# PROPUESTA DE UN MODELO METODOLÓGICO PARA ANALIZAR LA MADUREZ DE LA INTEGRACIÓN EN LA DIGITAL SUPPLY CHAIN DE PYMES.

Vázquez, Estefanía Romina; González, Julieta; Chiodi, Franco Javier; Rohvein, Claudia; Lindner, Carolina

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.*
*estefaniarominavazquez@gmail.com; julietagonzalez09@yahoo.com; fchiodi@fio.unicen.edu.ar ; crohvein@fio.unicen.edu.ar; lindner.carolina@gmail.com*

**RESUMEN**

La cadena de suministro digital es la evolución de la cadena tradicional, impulsada por tecnologías como la Industria 4.0, Big Data, Cloud Computing e IoT. Estas tecnologías permiten integrar, coordinar y optimizar el flujo de bienes, servicios e información.

Un modelo de madurez es una herramienta esencial para que las empresas evalúen su nivel de desarrollo y planifiquen mejoras. Facilita una visión clara de la situación actual, identifica ineficiencias y proporciona una hoja de ruta para alcanzar niveles superiores de madurez.

Nuestra investigación busca diseñar un modelo de madurez para la integración de la cadena de suministro digital, específicamente para PyMEs. Este modelo abarca procesos clave como aprovisionamiento, fabricación, almacenaje y entrega, así como el uso de herramientas digitales para complementar la gestión.

Actualmente, no existe un modelo que integre todos los aspectos de la cadena de suministro y la digitalización de manera conjunta. Este análisis madurativo pretende identificar oportunidades de mejora y optimización de procesos, impulsando la competitividad de las PyMEs.

La herramienta determinará el grado de madurez de las organizaciones vinculando la logística tradicional con la integración de tecnologías 4.0, particularmente en el flujo de información. Además, permitirá establecer el nivel de madurez de la cadena de suministro digital de una PyME, basándose en variables y niveles definidos a través de una exhaustiva revisión bibliográfica.

**Palabras Claves:** Cadena de suministro, Cadena de Suministro Digital (DSC), Modelo de Madurez, Digitalización, Pyme.

## 1. INTRODUCCIÓN

La cadena de suministro (SC) abarca todas las actividades relacionadas con el flujo y transformación de bienes, desde la etapa de la materia prima hasta el usuario final, así como los flujos de información relacionados.

Las etapas de la cadena de suministro incluyen el *aprovisionamiento*, es decir la obtención de la materia prima necesaria y los procesos asociados; la *fabricación* que se basa en la transformación de la materia prima en producto terminado; el *almacenaje* que involucra la gestión de stock, organización de transporte y distribución de productos y finalmente la *entrega* donde el producto llega al cliente final desde el almacén o cualquier otro punto de venta.

Hoy en día, las cadenas de suministro tienen un ciclo de vida acelerado y están en constante evolución; esta evolución está impulsada por los cambios en los mercados y las necesidades emergentes de una “Cuarta Revolución Industrial”, es por eso que han surgido nuevos términos para las cadenas de suministro digitalizadas. Este es el caso del concepto de Cadena de Suministro Digital (Digital Supply Chain), que se refiere a la evolución de cómo se gestionan las cadenas de suministro actuales en la Industria 4.0 (Machado & Taboada Rodriguez, 2025).

Es necesario contar con modelos de análisis de estas cadenas que permitan, no solo diagnosticar su estado de situación, sino también delinear acciones para que aumenten su competitividad. Entre ellas, existen los modelos de madurez organizacional.

Actualmente, no existe un modelo que integre todos los aspectos de la cadena de suministro y la digitalización de manera conjunta. Este análisis madurativo pretende identificar oportunidades de mejora y optimización de procesos, impulsando la competitividad de las PyMEs.

Nuestra investigación busca diseñar un modelo de madurez para la integración de la cadena de suministro digital, específicamente para PyMEs. Este modelo abarca procesos clave como aprovisionamiento, fabricación, almacenaje y entrega, así como el uso de herramientas digitales para complementar la gestión.

## 2. MARCO TEÓRICO

En esta sección, presentaremos los fundamentos teóricos como base del presente estudio, que abarcan la conceptualización de la cadena de suministro digital y los modelos de madurez.

### 2.1. Digital Supply Chain

La cadena de suministro digital (DSC por sus siglas en inglés) se define como el desarrollo de sistemas de información y la adopción de tecnologías innovadoras que fortalecen la integración y la agilidad de la cadena de suministro, mejorando así el servicio al cliente y el rendimiento sostenible de la organización (Ageron et al., 2020)

Otra definición la expresa como "un conjunto de actividades interconectadas, manejadas con tecnologías novedosas, involucradas en los procesos de la cadena de suministro entre proveedores y clientes". También se describe como un "proceso inteligente, de valor agregado y novedoso que utiliza nuevos enfoques, específicamente la transformación digital con tecnologías, para crear valor competitivo y efectos de red" (Nasiri et al., 2022).

La DSC integrará tecnologías innovadoras (p. ej., realidad aumentada, big data y blockchain), se centrará en los clientes/consumidores, reducirá los costes intra e interorganizacionales y generará mayor valor para las organizaciones. (Ageron et al., 2020)

Luego de analizar las distintas definiciones publicadas por los autores, se puede afirmar que una DSC representa la evolución de una cadena de suministro tradicional, basada en tecnologías innovadoras (Industria 4.0, Big Data, Cloud Computing, Internet of Things, Blockchain, etc.) que permiten integrar, coordinar y optimizar todos los procesos involucrados en el flujo de bienes, servicios e información.

Tal como expresan Büyüközkan y Göçer (2018), las DSC se distinguen por una serie de características que responden a los desafíos actuales de eficiencia, sostenibilidad y adaptación tecnológica. Las ventajas son:

- Velocidad en la entrega de los productos y en el flujo de información, se busca mover más en menos tiempo

- Flexibilidad para adaptarse ágilmente a contextos cambiantes
- Conectividad Global ya que se construyen centros globales eficaces para el suministro local de bienes y servicios
- Inventario en tiempo real ya que busca evitar un stock de seguridad excesivo para que las entregas sean inmediatas
- Inteligencia donde se utilizan tecnologías que permiten una mejor toma de decisiones, la ejecución automatizada e impulsa la innovación operativa
- Transparencia, asegurando una coordinación fluida entre todos los actores de la cadena
- Rentabilidad donde los costos iniciales de inversión pueden ser elevados pero con el tiempo disminuyen al utilizar tecnologías digitales
- Escalabilidad, facilitando la expansión o contracción de operaciones según la demanda
- Innovador, es necesaria para que las DSC estén siempre abiertos al cambio
- Proactivo impone acciones proactivas para prevenir posibles interrupciones
- Ecológico al tener una DSC, el impacto en el medio ambiente es casi nulo

Por otro lado, la gestión de la DSC enfrenta diversos desafíos. Entre ellos, se destaca la falta de planificación y herramientas adecuadas, así como la escasa colaboración interna y con socios externos. Los pronósticos de demanda suelen ser inexactos y optimistas, agravados por la poca disposición a compartir información. También influye la creencia de que una única solución resolverá todos los problemas, sumado a la falta de capacitación específica. La cadena suele carecer de agilidad y flexibilidad, y muchas empresas no están preparadas para gestionar la volatilidad. Además, hay una dependencia excesiva de ciertos proveedores y una visión limitada sobre la integración digital y no digital de la cadena.

### 2.2. Modelos de madurez de la DSC

La madurez implica un progreso evolutivo de una entidad desde una etapa inicial hasta una etapa final deseada o alcanzable. Antes de alcanzar la etapa final, es necesario experimentar diferentes niveles de madurez (etapas de crecimiento). Los modelos de madurez permiten evaluar la situación actual y transformar hacia un estado deseado y mejorado. El objetivo final es obtener y mantener ventajas competitivas.

Dos Santos et al. (2018) considera que los modelos de madurez (MM) son aquellos que permiten definir el grado de madurez alcanzado por la organización en un campo de aplicación específico y su análisis identifica potenciales mejoras y estimula el proceso de mejora continua ya sea en la gestión de procesos, calidad, logística, tecnología u otra área de interés. Por su parte, Bititci et al. (2015) considera un modelo de madurez como una matriz de prácticas que define, para cada área organizacional, el nivel de formalidad, sofisticación e incorporación de prácticas desde ad hoc hasta optimizado.

A medida que una cadena de suministro avanza en su transformación digital 4.0, se encuentra con diferentes arquetipos de madurez (Alicke, 2016):

- Cadena de Suministro 2.0: CS principalmente basadas en papel con un bajo nivel de digitalización, donde la mayoría de los procesos se ejecutan manualmente. Las capacidades digitales de la organización son muy limitadas y los datos disponibles no se aprovechan para mejorar las decisiones de negocio;
- Cadena de Suministro 3.0: CS con componentes digitales básicos. Los sistemas de TI están implementados y se aprovechan, pero aún es necesario desarrollar las capacidades digitales. Solo se utilizan algoritmos básicos para la planificación y la previsión, y solo unos pocos científicos de datos forman parte de la organización para mejorar su madurez digital;

- Cadena de Suministro 4.0: CS en el nivel más alto de madurez que aprovechan todos los datos disponibles para un soporte mejorado, más rápido y más granular en la toma de decisiones. Se utilizan algoritmos avanzados y un amplio equipo de científicos de datos trabaja dentro de la organización, siguiendo una clara ruta de desarrollo hacia el dominio digital.

## 3. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico que se utiliza en esta investigación se basa en el estudio de caso (Martins et al., 2014), ya que se considera una herramienta adecuada para analizar en profundidad situaciones que dependen del contexto actual, como en este caso los modelos de madurez en cadenas de suministro digitales en pymes.

En primer lugar, se lleva a cabo una revisión bibliográfica en distintas bases de datos científicas reconocidas. Esta etapa resulta clave porque permite conocer los diferentes puntos de vista de autores y especialistas vinculados a la DSC, y a modelos de madurez, además de identificar los temas más discutidos, los aportes realizados y también los vacíos o limitaciones que todavía presenta la literatura.

En la segunda etapa, a partir de la información recolectada en la fase anterior, se procede a identificar los elementos principales que conforman un modelo de madurez, como las dimensiones, variables y prácticas relevantes. El objetivo es ordenar y sistematizar la información existente para luego contar con una base sólida que sirva en el análisis del caso en cuestión.

Finalmente, se avanza en la construcción de la estructura completa del modelo de madurez, donde se detallan y describen, de manera cualitativa y cuantitativa, los niveles que lo componen. Esta instancia busca integrar lo que plantea la teoría con lo que se observa en la práctica, de modo que el modelo resulte claro, aplicable y fácil de interpretar en distintos contextos.

Las etapas antes mencionadas de la metodología de investigación se muestran en la *Figura 1*:




*Figura 1. Etapas de la metodología de investigación*

## 4. RESULTADOS

En esta sección, se detallan los resultados alcanzados en cada una de las fases de la propuesta metodológica, que se expuso en la *Figura 1*.

En lo que refiere a la búsqueda bibliográfica, un primer estudio exploratorio de la literatura en Google Scholar arrojó 10 resultados en términos “Digital supply chain” and/or “supply chain 4.0” and/or “Digital supply chain maturity”, en el periodo 2018-2025.

A partir de los resultados de la revisión bibliográfica, se ha logrado establecer una serie de elementos que definen la estructura fundamental del modelo de madurez para cadenas de suministro digitales en PyMEs. Este modelo se construye a partir de la síntesis de información obtenida de 10 artículos y tres libros, que sirvieron como base para su desarrollo.

Hellweg et al. (2021), en su review, señala que “La mayoría de los MM examinados son cuadrículas. Una de las razones de su uso frecuente es la representación detallada de las dimensiones y características de cada nivel”. Por ello, adoptaremos ese formato para nuestro modelo de madurez.

La grilla presenta la estructura que se describe en la *Tabla 1*, identificando dimensiones, variables y subvariables, y las escalas/niveles de madurez.

*Tabla 1: Estructura conceptual del modelo de madurez.*

| ***Dimensión*** | ***Variable*** | ***Subvariable*** | ***Nivel 1*** | ***Nivel 2*** | ***……*** | ***Nivel j*** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| D1 | V1 | V1.1, V1.2, V1.N | | | | |
| D2 | V2,V3 | V2.1, V3.1, V3.2, … | | | | |

*Fuente: Elaboración propia a partir de Hellweg (2021).*

La estructura para definir el grado de madurez se determinará en base a dos dimensiones principales: (**a**) Integración y colaboración de la SC, y (**b**) Digitalización. Cada una de estas dimensiones se ramifican en variables y luego en subvariables más específicas, con las que luego se detallan las prácticas en las que se pueden desarrollar, es decir, cómo se puede representar dentro de una empresa el uso de esta subvariable específica y su evidencia en la realidad.

La Integración y colaboración de la CS se subdivide en las variables aprovisionamiento, fabricación, almacenaje y entrega, que se ramifican en varias subvariables, como se presenta en la *Tabla 2*.

*Tabla 2. Variables y subvariables de la dimensión "Integración y colaboración de la cadena de suministro".*

| **Variables** | **Subvariables** | **Fuente** |
|---|---|---|
| Aprovisionamiento | Comunicación digital en tiempo real con proveedores | *(Chopra y Meindl, 2013)* |
| | Alianzas estratégicas a largo plazo | |
| | Nivel de digitalización de los pedidos | |
| Fabricación | Compartición de planes de producción con otros actores | |
| | Participación de proveedores en procesos de mejora continua | |
| | Uso de plataformas digitales compartidas para la producción | |
| Almacenaje | Acceso compartido al inventario con clientes o proveedores | |
| | Gráfica de pareto (A, B, C) | |
| | Gestión conjunta de centros de distribución | |
| | Coordinación de almacenamiento con socios logísticos externos | |
| Entrega | Seguimiento compartido de entregas en tiempo real | |
| | Planificación colaborativa de rutas y entregas | |
| | Gestión integrada de devoluciones | |
| | Uso de plataformas digitales compartidas con operadores logísticos | |

Por otro lado, la dimensión Digitalización se subdivide en las variables Tecnologías de Información y Comunicación (TICs), Automatización y Robótica, Análisis de datos y toma de decisiones, Gestión de Trazabilidad y Seguridad, exhibidas con sus respectivas subvariables y fuentes en la *Tabla 3*.

*Tabla 3. Variables y subvariables de la dimensión Digitalización.*

| Variables | Subvariables | Fuente |
|---|---|---|
| Tecnologías de Información y Comunicación (TICs) | Cloud Computing | *Nasiri et al. (2020)* |
| | Tecnología de la información (TI) | |
| Automatización y robótica | Internet of Things (IoT) | *Garay-Rondero et al. (2020)* |
| | Cloud Robotics | |
| Análisis de datos y toma de decisiones | Big Data | *Büyüközkan y Göçer (2018)* |
| | Inteligencia Artificial | |
| | Simulación de Procesos | |
| Gestión de Trazabilidad y Seguridad | Blockchain | *Hellweg et al. (2021)* |
| | Data security | |

Para completar la estructura del MM, en lo referido a niveles de madurez, y con la finalidad de contar con una graduación sencilla y aplicable a pymes, se adhiere a la propuesta de Alicke (2016), que establece tres niveles de madurez: **2.0, 3.0** y **4.0,** siendo este último el más alto. Para otorgar un mayor impacto visual, se ha propuesta la "semaforización" de cada nivel, tal como se expone en la *Tabla 4*.

*Tabla 4. Nivel de madurez para cada variable.*

| | | Nivel de madurez | | |
|---|---|---|---|---|
| **Dimensión** | **Variable** | **CS 2.0 (Nivel inicial)** | **CS 3.0 (Nivel medio)** | **CS 4.0 (Nivel avanzado)** |
| D1 | V1 | | | |
| | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| | Vn | | | |

*Fuente: Elaboración Propia.*

Como ya se señaló, el detalle de cada variable según su nivel no solo establece la condición actual, sino que además establece lineamientos orientativos para la evolución madurativa.

A modo de ejemplo, se exponen las características de dos variables, una de cada dimensión, respecto a los tres niveles establecidos.

En la *Tabla 5*, se detallan los rasgos distintivos de la variable "Aprovisionamiento" en los niveles de CS 2.0, 3.0 y 4.0, a partir de una síntesis de las diversas fuentes bibliográficas consultadas.

*Tabla 5: Variable Aprovisionamiento según niveles*

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Aprovisionamiento** | El enfoque basado en el aprovisionamiento/comunicación con los proveedores es limitado, no se tiene un canal de comunicación digitalizada. | La empresa mantiene una comunicación directa con sus proveedores mediante canales digitales básicos, como plataformas de mensajería o correo electrónico estructurado. Si bien existe cierta digitalización, aún no hay una integración completa entre sistemas. La relación que se tiene con los mismos es más estable en algunos casos aunque aún no son fuertes las alianzas. | La comunicación con los proveedores está altamente digitalizada, con canales en tiempo real e integración entre sistemas. La empresa mantiene alianzas estratégicas de largo plazo con sus proveedores, basadas en la confianza mutua, la planificación conjunta y objetivos compartidos. El nivel de digitalización de los pedidos es elevado: los pedidos se generan, transmiten y controlan de forma automática, con visibilidad total en cada etapa del proceso. |

*Fuente: Elaboración Propia.*

Por otro lado, en la *Tabla 6*, la variable Tecnologías de Información y comunicación de la dimensión Digitalización es detallada en los tres niveles madurativos del MM.

*Tabla 6: Variable Tecnologías de Información y Comunicación por niveles.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Tecnologías de Información y Comunicación (TICs)** | No se utilizan soluciones en la nube para gestionar la cadena de suministro. Se opera con sistemas locales o herramientas básicas como planillas de cálculo, sin integración ni acceso remoto, lo que limita la colaboración y la actualización en tiempo real de la información. | Se han incorporado herramientas en la nube en forma limitada o en áreas puntuales de la cadena de suministro. Existe cierto acceso remoto y una mejora en la colaboración externa, pero los procesos no están completamente integrados ni automatizados. | La empresa gestiona integralmente su cadena de suministro a través de plataformas cloud avanzadas, con acceso remoto seguro, información en tiempo real y colaboración directa con proveedores y clientes. Se aplican tecnologías analíticas y automatización para optimizar procesos y decisiones. |

*Fuente: Elaboración Propia.*

De esta manera, se aborda la totalidad de los elementos estructurales del MM propuesto para la Cadena de Suministro Digital, enfocada en Pymes. Se definen las dos dimensiones clave, las variables y subvariables asociadas a cada dimensión, y los niveles de madurez, sobre la base de las fuentes bibliográficas consultadas.

Los próximos pasos en el desarrollo de este estudio implican diseñar el sistema de puntuación de cada variable, a partir de las evidencias respecto a las subvariables, que le permita identificar si su nivel de madurez es inicial, intermedio o avanzado. Con los puntajes obtenidos se establecerán los niveles que permitirán determinar el grado de madurez de la empresa.

Una vez diseñado el sistema de puntaje, el siguiente paso será diseñar y aplicar el instrumento de recolección de información en PyMEs de la región del centro bonaerense. Esto permitirá determinar el nivel de madurez de cada variable global y, en consecuencia, el nivel integral de madurez de la empresa. A partir de estos resultados, se identificarán las fortalezas y debilidades de la organización, lo que posibilitará elaborar un diagnóstico de su situación actual y, si se considera necesario, proponer oportunidades de mejora para incrementar el nivel de madurez de la PyME, en aquellas variables de menor desarrollo relativo.

## 4. CONCLUSIONES

Este estudio constituye un aporte significativo para el análisis de la cadena de suministro digital en PyMEs, al integrar en un mismo modelo tanto las dimensiones de integración y colaboración de la cadena de suministro como las relacionadas con la digitalización. De este modo, se posibilita una visión más amplia e integral de la situación real de la empresa, considerando de manera simultánea la gestión operativa y la incorporación de tecnologías emergentes vinculadas a la Industria 4.0.

Si bien existen modelos que abarcan la cadena de suministro en su totalidad, otros que contemplan diversas dimensiones de la digitalización o que presentan descripciones detalladas de niveles y variables, no se dispone actualmente de una propuesta que combine de manera integrada todos estos aspectos. En este sentido, la presente investigación busca dar respuesta a esa necesidad, ofreciendo una herramienta que permita evaluar de forma integral la madurez de la cadena de suministro digital en PyMEs.

Los resultados de la investigación, sobre la base de un análisis exploratorio de la literatura científica, permite identificar dos variables clave (integración y colaboración de la cadena de suministro; digitalización) y un conjunto de subvariables asociadas. Asimismo se establecen tres niveles de madurez, desde inicial, pasando por intermedio, hasta avanzado, para completar la configuración estructural del modelo de madurez. Finalmente, se describen en forma detallada, con la información recopilada, las características globales del comportamiento de cada variable, de acuerdo a cada uno de los tres niveles de evolución. Así se completa el formato conceptual del Modelo de Madurez de la Cadena de Suministro Digital.

Algunas limitaciones del estudio deben ser mencionadas. En primer lugar, la revisión bibliográfica se acota a una única base de datos, excluyendo potencialmente otros estudios. En segundo lugar, el MM propuesto se basa en dimensiones seleccionadas, por ejemplo, las áreas de la cadena de suministro, y las dimensiones de la digitalización, que solo representan una posible solución para abordar el análisis, sin considerarse exhaustiva. Por último, este trabajo da cuenta que la temática tiene potencialidad de continuar su desarrollo, tanto en el campo científico como en sus aportes a la gestión empresarial.

## 5. REFERENCIAS.


Ageron, B., Bentahar, O., & Gunasekaran, A. (2020). Digital supply chain: challenges and future directions. *Supply Chain Forum: An International Journal*, *21*(3), 133–138. https://doi.org/10.1080/16258312.2020.1816361

Ballou, R. H. (2004). Logística: Administración de la cadena de suministro (5a ed.). Pearson Prentice Hall.

Bititci, U.S.; Garengo, P.; Ates, A.; NudurupatI, S.S. Valor de los modelos de madurez en la medición del desempeño. Int. J. Prod. Res. 53, p.3062–3085, 2015.

Büyüközkan, G. y Göçer, F. (2018). Digital Supply Chain: Literature review and a proposed framework for future research. Computers in Industry, 97, 157-177.

Chopra, S., & Meindl, P. (2013). Administración de la cadena de suministro: Estrategia, planeación y operación (5a ed.). Pearson.

Dos Santos Bento, G., y Tontini, G. (2018). Desarrollar un instrumento para medir la madurez de la manufactura esbelta y su relación con el desempeño operativo, Gestión de calidad total y excelencia empresarial. 29, 977-995.

Garay-Rondero, C. L., Martinez-Flores, J. L., Smith, N. R., Caballero Morales, S. O., & Aldrette-Malacara, A. (2020). Digital supply chain model in Industry 4.0. Journal of Manufacturing Technology Management, 31(5), 887-917.

Hellweg, F., Janhofer, D. y Hellingrath, B. (2023). Towards a maturity model for digital supply chains. Logistics Research, 16(1), 1-35.

Hellweg, F., Lechtenberg, S., Hellingrath, B., & Thomé, A. M. T. (2021). Literature review on maturity models for digital supply chains. Brazilian Journal of Operations & Production Management, 18(3).

Machado, N. T., & Taboada Rodriguez, C. M. (2025). Logistics/SCM 4.0 maturity model review: Opportunities for Industry 4.0 technologies application. Revista de Gestão Social e Ambiental, 19(5), 1–18.

Nasiri, M., Ukko, J., Saunila, M. y Rantala, T. (2020). Managing the digital supply chain: The role of smart technologies. Technovation, 2020. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2020.102121

Palombo, S. (2019). Supply Chain 4.0: Digital Maturity Model [Master's thesis, Politecnico di Torino].

# "HERRAMIENTAS DIGITALES Y GESTIÓN DE CALIDAD EN PYMES INDUSTRIALES BONAERENSES: EVIDENCIAS DEL USO DE ESTAS TECNOLOGÍAS"

Gatti, Sebastián; Cusolito, Fernando; Altube, Lucas; Formento, Cecilia; Chiodi, Franco

*Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento*
sgatti@campus.ungs.edu.ar*;* fcusolito@campus.ungs.edu.ar*;* laltube@campus.ungs.edu.ar*; mcformento@campus.ungs.edu.ar; fchiodi@fio.unicen.edu.ar.*

**RESUMEN**

En un escenario de transformación tecnológica acelerada, las PyMEs industriales bonaerenses enfrentan el desafío de revisar sus modelos de gestión para sostener su competitividad. Este estudio analiza la relación entre la implementación de sistemas de gestión de la calidad (SGC) y la adopción de herramientas digitales, entendidas como decisiones estratégicas que reconfiguran la organización interna y proyectan nuevas capacidades operativas.

A partir del análisis de una base de datos de 1.261 empresas participantes del Programa Clínicas Tecnológicas, se identificó que aquellas con SGC certificados presentan mayores niveles de digitalización en procesos clave como automatización, sensores IoT, software de control de calidad y herramientas MRP. Esta correlación positiva refuerza la hipótesis de que calidad y tecnología se potencian mutuamente, consolidando entornos organizacionales más eficientes y orientados a la mejora continua.

El principal aporte del trabajo radica en evidenciar que la calidad y la digitalización no evolucionan de forma aislada, sino como vectores estratégicos que definen el perfil evolutivo de las PyMEs industriales. Los resultados ofrecen insumos concretos para el diseño de políticas públicas, estrategias de fortalecimiento institucional y esquemas de acompañamiento técnico que promuevan su integración en el tejido productivo local.

**Palabras Claves:** Calidad organizacional, digitalización industrial, gestión estratégica, PyMEs bonaerenses, transformación productiva.

**ABSTRACT**

In a context of accelerated technological transformation, industrial SMEs in the province of Buenos Aires face the challenge of revisiting their management models to maintain competitiveness. This study examines the relationship between the implementation of quality management systems (QMS) and the adoption of digital tools, understood as strategic decisions that reshape internal organization and project new operational capabilities.

Based on the analysis of a database of 1,261 companies participating in the Technological Clinics Program, the research identified consistent patterns: firms with certified QMS show higher levels of digitalization in key areas such as automation, IoT sensors, quality control software, and MRP tools. This positive correlation reinforces the hypothesis that quality and technology mutually enhance each other, consolidating more efficient, traceable, and improvement-driven organizational environments.

The study's main contribution lies in demonstrating that quality and digitalization do not evolve independently, but rather operate as strategic vectors that define the developmental profile of industrial SMEs. The findings provide concrete inputs for the design of public policies, institutional strengthening strategies, and technical support schemes that promote the integration of these practices into the local productive fabric.

Ultimately, the research offers a deeper understanding of the role of quality and technology in organizational management and proposes an integrated approach to developing business capabilities in demanding and transformative contexts.

**Keywords: Organizational quality, industrial digitalization, strategic management, Buenos Aires SMEs, productive transformation.**

## 1. INTRODUCCIÓN

En un escenario de cambio tecnológico acelerado y creciente complejidad organizacional, las PyMEs industriales de la provincia de Buenos Aires enfrentan el desafío de revisar sus modelos de gestión para sostenerse y evolucionar dentro del entramado productivo. En este contexto, la incorporación de sistemas de gestión de la calidad (SGC) y la digitalización de procesos no puede entenderse únicamente como una mejora técnica, sino como una transformación integral que impacta en la estructura, la organización del trabajo y la toma de decisiones dentro de las empresas.

Esta investigación parte de la premisa de que las prácticas de gestión de calidad y los procesos de digitalización constituyen decisiones estratégicas internas que reflejan la forma en que las organizaciones se adaptan, se organizan y proyectan hacia el futuro. En ese sentido, se propone analizar cómo estas dos dimensiones, calidad y herramientas de digitalización, están presentes en las PyMEs industriales bonaerenses, y cómo su articulación incide en la configuración de modelos organizativos más eficientes, trazables y competitivos.

A partir del análisis de una base de datos representativa de 1.261 empresas industriales que participaron del Programa Clínicas Tecnológicas de la Provincia de Buenos Aires, el estudio busca aportar evidencia empírica sobre los patrones actuales de gestión que adoptan las PyMEs, en especial aquellas que avanzan en la formalización de sistemas y en la incorporación de herramientas digitales. Los resultados muestran que las empresas con SGC certificados presentan mayores niveles de adopción tecnológica, tanto en procesos operativos como en soluciones específicas como sensores IoT, software de control de calidad, herramientas MRP y automatización. Esta correlación positiva entre calidad formalizada y digitalización refuerza la hipótesis de que ambas dimensiones se potencian mutuamente, consolidando entornos organizacionales orientados a la mejora continua y la eficiencia operativa.

El objetivo general es contribuir a una mejor comprensión del rol que la calidad y la digitalización cumplen en la gestión organizacional y la economía empresarial de este segmento productivo, y así aportar insumos para futuras estrategias de fortalecimiento institucional, acompañamiento técnico y diseño de políticas públicas orientadas al desarrollo de capacidades organizativas en el sector. En suma, el estudio busca visibilizar cómo la formalización de prácticas y la incorporación de tecnología no solo responden a exigencias externas, sino que configuran decisiones internas que definen el rumbo estratégico de las PyMEs industriales bonaerenses.

### 1.1. Estado del arte

Partiendo de la premisa de comprender como los Sistemas de gestión de calidad y la digitalización influyen en la competitividad de las PyMEs, desde una mirada global Cantele & Vernizzi, 2020 mencionan que las organizaciones que invierten en capital físico, capital humano y capital relacional construyen recursos valiosos, difíciles de imitar y, por tanto, generadores de diferenciación en el mercado.

Específicamente, Hernández Palma (2018), en su trabajo sobre gestión de la calidad como elemento clave para el desarrollo de las organizaciones, considera al SGC como una estrategia para impulsar la competitividad empresarial que permite, desde una perspectiva integral, observar la organización como un conjunto de procesos interrelacionados cuyo fin último es, entre otros, lograr la satisfacción del cliente.

En su trabajo sobre los efectos de la norma ISO 9001 Shiva Johri y Deepak Kumar (2021) encuentran que “las industrias con certificación del Sistema de gestión de la calidad muestran mejoras continuas desde el método hasta las medidas de calidad”, afirmando que la norma ofrece una base para la gestión continua de la calidad.

En otro los trabajo, Rahmat Nurcahyo, Zulfadlillah Muhammad & Habiburrahman (2021), al estudiar la relación entre la aplicación de ISO 9001:2015 y la performance operacional y de negocios de industrias en países en desarrollo encuentran que: la implementación del sistema de gestión de calidad ISO 9001: 2015 tiene un impacto positivo significativo en el desempeño operativo, así como en el desempeño comercial.

En el contexto latinoamericano, Anabalón Arenas (2020) concluye que las PyMEs chilenas pueden mejorar su competitividad mediante la incorporación de normas genéricas como las ISO.

Ya en lo que refiere a digitalización empresaria, en Argentina, el salto tecnológico observado en los últimos años se vincula con la adopción de herramientas como inteligencia artificial, plataformas CRM, automatización de procesos y soluciones “en la nube”. Este salto no es homogéneo: mientras algunas

empresas avanzan hacia modelos de producción inteligente, otras permanecen en niveles básicos o intermedios de digitalización (Vélez & Morero, 2024), reflejando las heterogeneidades estructurales del tejido productivo nacional.

De la misma forma, la pandemia aceleró la adopción tecnológica, pero también evidenció una brecha persistente entre grandes empresas y PyMEs. Según Becerra et al. (2022), las micro y pequeñas empresas enfrentan mayores barreras para invertir en capacidades digitales, lo que limita su potencial competitivo.

La transformación digital se ha consolidado entonces como un proceso estratégico indispensable para las organizaciones que buscan mantenerse competitivas en entornos productivos dinámicos. En el caso de las PyMEs industriales, la digitalización no solo implica la incorporación de tecnologías, sino una reconfiguración profunda de los modelos de gestión, la estructura organizativa y la cultura interna (Grupo Aspasia, 2025). Este proceso afecta transversalmente todas las áreas de la empresa, desde la automatización de tareas hasta la redefinición de los flujos de trabajo y la toma de decisiones basada en datos.

Diversos estudios destacan que la adopción de herramientas digitales en PyMEs industriales permite mejorar la trazabilidad, reducir costos operativos, aumentar la productividad y fortalecer la relación con los clientes (InovaLabs, 2025). La digitalización, además, habilita nuevas oportunidades de negocio y facilita la internacionalización, especialmente cuando se articula con sistemas de gestión de calidad que formalizan los procesos y promueven la mejora continua.

La literatura reciente también subraya que la digitalización no debe abordarse como una solución tecnológica aislada, sino como una estrategia integral que requiere diagnóstico organizacional, definición de objetivos, selección de herramientas adecuadas y capacitación del equipo (ATX Robotics, 2025). En este sentido, la articulación entre calidad y tecnología se presenta como un eje clave para el desarrollo de capacidades organizativas sostenibles en el tiempo.

### 1.2. Metodología

La presente investigación se basó en el análisis de la base de datos generada por el Programa Clínicas Tecnológicas del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Provincia de Buenos Aires, correspondiente al período 2018-2024. Dicha base incluye información de 1.261 empresas, relevadas durante todo el período, año a año, seleccionadas bajo tres criterios: cumplimiento con la clasificación como PyME según los parámetros del ex Ministerio de Producción de la Nación; localización en municipios con alta concentración industrial; y relevancia estratégica a nivel local, además de la disposición a participar mediante la respuesta a un cuestionario estructurado de 130 preguntas.

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo, de carácter descriptivo, con el objetivo de identificar relaciones entre prácticas organizacionales, calidad, digitalización y niveles de competitividad en forma general. Las variables relevadas incluyeron datos sobre facturación, cantidad de empleados, antigüedad, tipo de sistema productivo, inversiones, actividades de innovación, competencias del personal, vínculos con el sistema científico-tecnológico, capacidad exportadora, y especialmente, la presencia y características de los sistemas de gestión de calidad (SGC) y el grado de digitalización. Este diseño permitió explorar patrones comunes y tipificar perfiles de empresas en función de las variables y relaciones en estudio.

### 1.3 Análisis y resultados generales de la muestra

La muestra contiene 1.268 registros, con 170 variables descriptivas que recolectan información sobre las siguientes temáticas: datos filiatorios, uso de redes, sistemas de gestión de calidad, gestión de innovación (i+d), tecnología de producción, infraestructura y equipamiento, manejo de stock, finanzas, recursos humanos, y aspectos medioambientales y energéticos.

Localidades: El periodo de relevamiento correspondió entre los años 2018 y 2024. El 70% de los datos fue recolectado en 12 municipios de la Provincia de Buenos Aires: Tres de Febrero, Lanús, General San Martín, General Pueyrredón, La Matanza, Junín, Berazategui, San Miguel, Exaltación de la Cruz, Olavarría, Pilar y Balcarce.

Sectores; Los principales rubros son metalmecánicos (25%), alimentos y bebidas (22%) y Textil y Calzado (8%).

#### 1.3.1 Calidad y digitalización

En un primer análisis, se presenta cómo dentro de la muestra están distribuidas las firmas que utilizan sistema de gestión de la calidad y las que no lo utilizan, según segmentos de la tabla 1.

*Tabla 1. Sistemas de gestión de la calidad y certificaciones*

| SGC | Cantidad | % |
|---|---|---|
| Certificado | 244 | 19% |
| En uso, no certificado | 228 | 18% |
| Sin sistema de calidad | 789 | 63% |
| Total | 1261 | 100% |

Un 37% de las empresas emplea un sistema de gestión de calidad. De ellas el 19% está certificado y el restante 18% no lo está. Entre las empresas que no están usando sistemas de gestión de calidad, un 21% prevé implementarlo.

### 1.3.2 Vinculación entre gestión de la calidad y digitalización

La siguiente tabla muestra una primera aproximación a la relación entre la adopción de sistemas de gestión de la calidad (SGC) y el grado de digitalización en una muestra de 1.261 PyMEs industriales de la provincia de Buenos Aires. Los datos sugieren que la implementación de sistemas de calidad, especialmente cuando están certificados, se asocia con un mayor nivel de digitalización.

*Tabla 2. Distribución de PyMEs industriales según tipo de Sistema de Gestión de la Calidad (SGC) y nivel de digitalización.*

| Sistema de Gestión de Calidad (SGC) | Cantidad | % sobre el total | Con digitalización | Sin digitalización |
|---|---|---|---|---|
| Certificado | 244 | 19% | 180 | 64 |
| En uso, no certificado | 228 | 18% | 145 | 83 |
| Sin sistemas de calidad | 789 | 63% | 330 | 459 |
| Total | 1261 | 100% | 655 | 606 |

La tabla muestra entonces la relación entre la implementación de sistemas de gestión de la calidad (SGC) y el grado de digitalización en una muestra de 1.261 PyMEs industriales de la provincia de Buenos Aires. La mayoría (63%) no cuenta con ningún sistema formal de calidad. De las empresas con SGC certificado, un 74% está digitalizada (180 de 244). A medida que disminuye el nivel de formalización en la gestión de la calidad, también disminuye la proporción de empresas digitalizadas: solo el 42% de las que no tienen SGC están digitalizadas (330 de 789). Estos primeros datos corroboran la hipótesis de que existe una correlación positiva entre la adopción de sistemas de calidad y la digitalización, factores que, combinados, tienden a fortalecer el desempeño de la Pymes en estudio.

### 1.4 Análisis en el uso de herramientas digitales y gestión de calidad

En el marco del presente apartado, se analiza el grado de incorporación de herramientas digitales en las PyMEs industriales bonaerenses de la muestra, en estrecha relación con la presencia o ausencia de sistemas de gestión de calidad. La selección de variables, que incluye la percepción sobre soluciones TIC, la automatización de procesos digitales, el uso de sensores e IoT para control de planta y maquinaria, el software para gestión de calidad y producción, y las herramientas MRP digitales para planificación operativa, permite caracterizar distintos niveles de madurez tecnológica y su integración en la lógica productiva. Estas dimensiones no solo reflejan el estado actual de digitalización, sino que permiten contrastar patrones de adopción entre empresas con y sin sistemas de calidad, identificando correlaciones descriptivas entre formalización operativa y uso efectivo de soluciones digitales. El análisis conjunto de estas variables ofrece un marco técnico para comprender las condiciones reales de transformación digital en el sector, y aporta evidencia para orientar estrategias de mejora, asistencia técnica y políticas de desarrollo productivo.

### 1.4.1. Soluciones TIC e importancia de su adopción

Comenzamos analizando la percepción sobre la importancia de las soluciones TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación) como factor de desempeño en las empresas de la muestra, en función de la presencia o ausencia de sistemas de gestión de calidad (SGC). Las soluciones TIC incluyen herramientas digitales que permiten optimizar procesos, mejorar la trazabilidad, integrar datos y fortalecer la toma de decisiones. El objetivo es observar si las empresas con SGC valoran más estas tecnologías como determinantes para su desempeño competitivo.

*Tabla 3. Soluciones TIC e importancia de su adopción*

| Con / Sin sistema de Calidad | ¿Considera las soluciones TIC importantes para generar competitividad en su organización? | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Determinante | | Importante | | Poco importante | |
| | Recuento | % | Recuento | % | Recuento | % |
| Con Sistema de Calidad Certificado | 70 | 30% | 150 | 18% | 4 | 9% |
| Sistema de calidad uso, no certificado | 50 | 21% | 155 | 18% | 1 | 2% |
| Sin sistema de calidad | 115 | 49% | 538 | 64% | 41 | 89% |
| TOTALES | 235 | 100% | 843 | 100% | 46 | 100% |

La tabla muestra que el 51% de las respuestas que consideran a las soluciones TIC como determinantes provienen de empresas con algún tipo de sistema de calidad (certificado o en uso), mientras que el 49% corresponde a organizaciones sin sistema. En la categoría “Importante”, el 36% de las respuestas pertenecen a empresas con SGC, frente al 64% sin sistema. En cambio, entre quienes consideran las TIC como poco importantes, el 89% no cuenta con ningún sistema de calidad. Estos datos refuerzan la asociación entre la formalización de procesos mediante sistemas de calidad y una mayor valorización estratégica de las tecnologías digitales.

En conjunto, los datos evidencian que la adopción de soluciones TIC como estrategia competitiva está más presente en organizaciones que han avanzado en la formalización de sus procesos mediante sistemas de calidad. Esto sugiere una sinergia entre calidad y digitalización, donde ambas dimensiones se potencian mutuamente en entornos organizacionales más estructurados.

### 1.4.2. Procesos digitales automatizados

Este apartado analiza la relación entre la implementación de sistemas de gestión de la calidad (SGC) y el nivel de automatización digital de procesos en la muestra. Se considera la automatización como una dimensión operativa clave dentro del proceso de digitalización organizacional. El objetivo es observar si la presencia de sistemas de calidad, ya sean certificados o en uso, se vincula con una mayor propensión a automatizar procesos productivos o administrativos, como indicador de madurez tecnológica.

*Tabla 4. Procesos digitales automatizados*

| Con / Sin sistema de Calidad | Procesos digitales automatizados | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ninguno | | Algunos | | Todos | |
| | Recuento | % | Recuento | % | Recuento | % |
| Certificado | 52 | 10% | 173 | 25% | 19 | 38% |
| En uso, no certificado | 61 | 12% | 153 | 22% | 13 | 26% |
| Sin sistema de calidad | 386 | 77% | 375 | 53% | 18 | 36% |
| TOTALES | 499 | 100% | 701 | 100% | 50 | 100% |

Los datos muestran una tendencia consistente: las empresas que cuentan con sistemas de gestión de calidad certificados presentan una mayor proporción de procesos digitales automatizados. En el segmento de automatización total, el 38% de las empresas tienen SGC certificado, más el 26% de las que usan pero no están certificada (dando en total el 64%), mientras que solo el 36% no poseen ningún sistema de calidad. Esta diferencia se atenua en el grupo con automatización parcial, donde el 47% de las empresas tienen algún tipo de SGC (certificado o en uso), frente al 53% sin sistema. En cambio, entre las empresas sin automatización, el 77% no cuenta con ningún sistema de calidad. Estos resultados refuerzan la hipótesis de que la adopción de sistemas de calidad está positivamente correlacionada con la automatización de procesos, lo que sugiere una mayor predisposición hacia la digitalización en las empresas que formalizan sus prácticas de gestión. La certificación aparece como un catalizador para la incorporación de tecnologías digitales, consolidando un perfil organizacional más estructurado y orientado a la mejora continua.

### 1.4.3. Utilización de IOT o sensores para control de procesos y automatización en planta, o para control de funcionamiento de maquinaria

Este apartado examina la relación entre la presencia de sistemas de gestión de calidad (SGC) y la adopción de sensores IoT para el control de procesos y automatización en planta o maquinaria. Los sensores IoT representan una tecnología clave para la digitalización operativa, al permitir la recolección de datos en tiempo real, la toma de decisiones autónomas y la optimización de tareas en entornos industriales, logísticos o agrícolas. El objetivo es observar si las empresas con sistemas de calidad muestran una mayor propensión a incorporar estas tecnologías.

*Tabla 5. Utilización de IOT o sensores*

| Con / Sin sistema de Calidad | Utilización de IOT o sensores para control de procesos y automatización en planta, o para control de funcionamiento de maquinaria | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | No, y no está en planes | | No, pero está en planes | | Sí | |
| | Recuento | % | Recuento | % | Recuento | % |
| Con Sistema de Calidad Certificado | 83 | 13% | 76 | 22% | 83 | 31% |
| Sistema de calidad uso, no certificado | 86 | 13% | 85 | 25% | 54 | 20% |
| Sin sistema de calidad | 471 | 74% | 180 | 53% | 128 | 48% |
| TOTALES | 640 | 100% | 341 | 100% | 265 | 100% |

Los datos revelan una correlación positiva entre la existencia de SGC y el uso de sensores IoT. Entre las empresas que ya utilizan sensores, el 31% cuenta con SGC certificado y el 20% con sistemas en uso no certificados, sumando un 51% con algún tipo de sistema de calidad. En contraste, el 48% de las empresas que usan sensores no tiene ningún sistema de calidad. Esta proporción se invierte en el grupo que aún no utiliza sensores pero los tiene en planes: el 53% no cuenta con SGC, mientras que el 47% sí lo tiene (22% certificado y 25% en uso). Finalmente, entre las empresas que no utilizan sensores ni los tienen en planes, el 74% no posee ningún sistema de calidad, frente a un 26% que sí lo tiene (13% certificado y 13% en uso).

Estos resultados refuerzan la hipótesis de que la formalización de prácticas de gestión mediante sistemas de calidad está asociada con una mayor predisposición a adoptar tecnologías IoT. La certificación aparece nuevamente como un factor que impulsa la incorporación de soluciones digitales, consolidando un perfil organizacional más estructurado y orientado a la mejora continua.

### 1.4.4. Utilización de software para control de calidad y producción

Este apartado analiza la relación entre la implementación de sistemas de gestión de calidad (SGC) y el uso de software para el control de calidad y producción en las empresas de la muestra. El uso de este tipo de software representa una herramienta clave dentro de la digitalización operativa, al permitir la trazabilidad, el monitoreo en tiempo real y la mejora continua de los procesos productivos. El objetivo

es observar si las empresas con SGC presentan una mayor propensión a incorporar estas soluciones digitales.

*Tabla 6. Utilización de software para control de calidad y producción*

| Con / Sin sistema de Calidad | ¿Utiliza software para control de calidad y producción? | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | No necesitamos | | No, pero necesitaríamos | | SI (enlatado / a medida) | |
| | Recuento | % | Recuento | % | Recuento | % |
| Con Sistema de Calidad Certificado | 72 | 12% | 150 | 18% | 77 | 47% |
| Sistema de calidad uso, no certificado | 70 | 11% | 155 | 18% | 40 | 24% |
| Sin sistema de calidad | 467 | 77% | 538 | 64% | 47 | 29% |
| TOTALES | 609 | 100% | 843 | 100% | 164 | 100% |

Los datos muestran que el 71% de las empresas que utilizan software para control de calidad y producción cuentan con algún tipo de sistema de calidad (47% certificado y 24% en uso no certificado), mientras que solo el 29% no posee ningún sistema. En contraste, entre las empresas que no utilizan software, ya sea porque no lo necesitan o porque lo consideran necesario pero no lo han implementado, el 77% no cuenta con ningún sistema de calidad, frente a un 23% que sí lo tiene. Esta diferencia refuerza la hipótesis de que la adopción de sistemas de calidad está positivamente correlacionada con el uso de herramientas digitales específicas para la gestión operativa. La certificación aparece nuevamente como un factor que impulsa la incorporación de soluciones tecnológicas, consolidando un perfil organizacional más estructurado y orientado a la eficiencia.

### 1.4.5. Utilización de herramientas de MRP digitales

La siguiente variable indaga sobre el uso de herramientas digitales de planificación de requerimientos de materiales (MRP), fundamentales para la gestión eficiente de inventarios, compras y producción. Estas soluciones permiten anticipar necesidades, optimizar recursos y mejorar la coordinación entre áreas, siendo especialmente relevantes en entornos industriales con procesos complejos o de alta variabilidad. El objetivo es contrastar el uso efectivo de MRP digitales con la presencia de sistemas de calidad, evaluando si existe una correlación entre ambos factores.

*Tabla 7. Utilización de herramientas de MRP digitales*

| Con / Sin sistema de Calidad | ¿Utiliza herramientas de MRP digitales? | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Necesitamos pero no tenemos | | No necesitamos | | SI (enlatado / a medida) | |
| | Recuento | % | Recuento | % | Recuento | % |
| Con Sistema de Calidad Certificado | 71 | 16% | 68 | 12% | 105 | 44% |
| Sistema de calidad uso, no certificado | 100 | 22% | 73 | 13% | 53 | 22% |
| Sin sistema de calidad | 276 | 62% | 435 | 76% | 78 | 33% |
| TOTALES | 447 | 100% | 576 | 100% | 236 | 100% |

Entre las empresas que utilizan herramientas MRP digitales, el 66% cuenta con algún tipo de sistema de calidad (44% certificado y 22% en uso no certificado), mientras que el 33% no posee ningún sistema. En cambio, entre las empresas que no utilizan MRP, agrupando tanto a quienes no lo necesitan como a quienes lo consideran necesario pero no lo han implementado, el 69,5% no cuenta con ningún sistema de calidad, frente a un 30,5% que sí lo tiene. Esta diferencia refuerza la hipótesis de que la existencia

de sistemas de calidad está asociada a una mayor adopción de herramientas digitales de planificación. Las empresas con certificación presentan el mayor grado de implementación (44%), lo que sugiere que la formalización de procesos y la trazabilidad operativa impulsan la incorporación de soluciones tecnológicas avanzadas.

### 1.5 Relación entre calidad, digitalización y desempeño, resultados generales

Los resultados estadísticos descriptivos generales muestran que las empresas que implementan sistemas de gestión de calidad (SGC) y digitalización de procesos presentan ventajas competitivas significativas. La muestra evidencia que estas organizaciones tienden a ser de mayor tamaño, contar con una trayectoria más extensa, realizar inversiones sostenidas en tecnología e innovación, disponer de personal altamente calificado y mantener vínculos estratégicos con instituciones científico-tecnológicas.

El análisis general de estas variables dentro de este apartado ratifica entonces que el SGC actúa como habilitador de la digitalización, al establecer procesos estandarizados que facilitan la incorporación de tecnologías digitales. A su vez, la digitalización potencia la capacidad de respuesta, la trazabilidad y la eficiencia operativa, generando condiciones propicias para la innovación y la expansión comercial. Esta sinergia entre calidad y digitalización se traduce en mejoras concretas en indicadores como productividad, exportación y profesionalización de la gestión.

La relación tripartita entre SGC, digitalización y competitividad se manifiesta entonces con mayor intensidad en aquellas empresas que han logrado integrar ambos enfoques de manera estratégica. Estas organizaciones no solo optimizan sus procesos internos, sino que también acceden a nuevos mercados, adaptan sus modelos de negocio y fortalecen su posicionamiento frente a competidores. Tal como señalan Reyes Chacón et al. (2022), el SGC puede promover la creatividad y la adaptación, mientras que la digitalización amplifica el alcance de estas capacidades mediante herramientas tecnológicas avanzadas.

## 3. CONCLUSIONES.

El presente trabajo permitió evidenciar que la implementación de sistemas de gestión de calidad (SGC), especialmente cuando están certificados, se vincula de manera consistente con una mayor adopción de herramientas digitales en las PyMEs industriales bonaerenses. A partir del análisis de una muestra representativa de 1.261 empresas, se observó que aquellas organizaciones que formalizan sus prácticas de gestión presentan mayores niveles de digitalización, tanto en procesos operativos como en la incorporación de tecnologías específicas.

Las variables analizadas, percepción sobre soluciones TIC, automatización de procesos, uso de sensores IoT, software para control de calidad y producción, y herramientas MRP digitales, mostraron correlaciones positivas entre la presencia de SGC y la adopción tecnológica en herramientas digitales. En todos los casos, las empresas con sistemas certificados lideran los porcentajes de implementación, seguidas por aquellas con sistemas en uso no certificados, mientras que las empresas sin SGC presentan los niveles más bajos de digitalización y/o uso de herramientas digitales.

Estos resultados refuerzan la hipótesis de que la calidad y la digitalización no avanzan de forma aislada, sino que se potencian mutuamente en entornos organizacionales más estructurados. La certificación aparece como un catalizador que impulsa la incorporación de soluciones tecnológicas, consolidando perfiles empresariales orientados a la mejora continua, la eficiencia operativa y la competitividad.

En conjunto, el estudio aporta evidencia empírica para orientar estrategias de fortalecimiento institucional, asistencia técnica y políticas públicas que promuevan la integración de calidad y tecnología en el tejido productivo local. La formalización de procesos, acompañada por la adopción de herramientas digitales, se configura como una vía concreta para mejorar el desempeño de las PyMEs industriales en contextos de alta exigencia y transformación.

## 4. REFERENCIAS


- Anabalón Arenas, G. A. (2020). Sistemas de gestión de calidad para la competitividad en PYMES chilenas [Tesis de maestría, Universidad Bernardo O'Higgins, Facultad de Ingeniería, Ciencias y Tecnologías].
- ATX Robotics. (2025, abril 30). *Digitalización en PYMES: El camino hacia la transformación digital*.
- Becerra, A. G., Hasda, G., Ramos Nervi, C., & Erben, D. (2022). Análisis de la madurez digital de las empresas argentinas y su impacto en la gestión.

- Cantele, S., & Vernizzi, G. (2020). SMEs' relational capital and sustainability strategies: A resource-based perspective. Business Strategy and the Environment, 29(3), 1010–1024. https://doi.org/10.1002/bse.2404
- Estupiñán-Moreno, A. H., Quiñónez-Klinger, A. H., Benites-Valverde, L. A., & Estupiñán-Guachamin, K. A. (2024). La transformación digital y su impacto en la competitividad de las pequeñas y medianas empresas (PyMEs).
- Formento H., Chiodi F., Cusolito F., Altube L., Gatti S., "Relationships of quality management systems certification with business performance. Evidences from Argentina small and medium companies", International Conference on Industrial Engineering and Operations Management ICIEOM 2012, Portugal.
- Formento H., Firka, D., Chiodi F., Cusolito F., Altube L., Gatti S. (2012) "Sistemas de Gestión de Calidad y performance de negocios en PyMEs industriales argentinas. Elementos Conceptuales y evidencias empíricas.", 17º Reunión Anual RED PYMES Mercosur 2012, Universidad de Sao Paulo, setiembre 2012.
- Grupo Aspasia. (2025, enero 20). *Transformación digital y su impacto en las organizaciones.*
- Hernández Palma, H. G. (2018). Gestión de la calidad: elemento clave para el desarrollo de las organizaciones. Criterio Libre, 16(28), 169–185.
- InovaLabs. (2025). *Cómo digitalizar procesos en una pyme industrial paso a paso*
- Johri, S., & Kumar, D. (2021). Evaluation of effect of ISO 9001:2008 standard implementation on TQM parameters in manufacturing & production processes performance in small enterprises. Materials Today: Proceedings.
- Nurcahyo, R., Zulfadlillah, & Habiburrahman, M. (2021). Relationship between ISO 9001:2015 and operational and business performance of manufacturing industries in a developing country (Indonesia).
- Reyes Chacón, D. A., Cadena López, A., & Rivera González, G. (2022). El Sistema de Gestión de Calidad y su relación con la innovación. Interdisciplina, 10(26), 217–240.
- Vargas Vega, L. (2019, junio 1). Los procesos de transformación digital no implican un incremento en el desempleo.
- Vélez, J. G., & Morero, H. (2024). Los desafíos de la digitalización en Pymes manufactureras de la Argentina: un recorrido sobre los avances empíricos recientes. Revista Pymes, Innovación y Desarrollo, 12(1), 7–31.

# ADOPCIÓN DE TECNOLOGÍAS 4.0 EN MERCADOS FRUTIHORTÍCOLAS DE LA CIUDAD DE MAR DEL PLATA

Morcela, Antonio; Tabone, Luciana; Evans, Erico; Cecive, Maximiliano

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.*
*omorcela@fi.mdp.edu.ar; ltabone@fi.mdp.edu.ar; ericoe08@gmail.com; maxicecive94@gmail.com*

**RESUMEN**

La integración de tecnologías de la Industria 4.0 se ha convertido en un imperativo estratégico para la optimización operativa y la eficiencia logística en el dinámico y competitivo entorno actual de las cadenas de suministro frutihortícolas. Este trabajo tiene como objetivo principal desarrollar un modelo metodológico estructurado para guiar la transición digital y la automatización de los operadores frutihortícolas de mercados abastecedores, con un análisis específico y focalizado en la ciudad de Mar del Plata. La metodología propuesta facilita la migración desde un estado operacional caracterizado por métodos manuales y analógicos hacia niveles avanzados de gestión y control, donde las operaciones se gestionan mediante herramientas digitales y sistemas automatizados. La investigación se estructura en cuatro fases principales, que corresponden a los distintos niveles tecnológicos, delineando en cada una las capacidades operativas requeridas, las herramientas tecnológicas específicas y las oportunidades de mejora que facilitan esta transición. El estudio incluye un diagnóstico del entorno tecnológico actual de los mercados frutihortícolas de Mar del Plata, identificando las barreras y facilitadores clave para la adopción de estas tecnologías. Además, se examinan las habilidades y competencias necesarias para el personal en cada nivel, así como las necesidades de formación continua que aseguran una implementación exitosa. El modelo resultante provee una hoja de ruta clara para la optimización de la gestión de datos, la comunicación interna y la capacidad de respuesta del mercado, sentando las bases para una ventaja competitiva sostenida en el sector.

**Palabras Claves:** Transformación digital, Mercado frutihortícola, Tecnologías 4.0, Modelo de adopción.

**ABSTRACT**

The integration of Industry 4.0 technologies has become a strategic imperative for operational optimization and logistics efficiency within the dynamic and competitive environment of current fruit and vegetable supply chains. This paper's main objective is to develop a structured methodological model to guide the digital transition and automation of fruit and vegetable operators in wholesale markets, with a specific and focused analysis on the city of Mar del Plata. The proposed methodology facilitates the migration from an operational state characterized by manual and analog methods to advanced levels of management and control, where operations are managed through digital tools and automated systems. The research is structured in four main phases that correspond to different technological levels, outlining the required operational capabilities, specific technological tools, and opportunities for improvement that facilitate this transition. The study includes a diagnosis of the current technological landscape of the fruit and vegetable markets in Mar del Plata, identifying key barriers and facilitators for the adoption of these technologies. Furthermore, it examines the necessary skills and competencies for staff at each level, as well as the continuous training needs that ensure a successful implementation. The resulting model provides a clear roadmap for the optimization of data management, internal communication, and market responsiveness, laying the foundation for a sustained competitive advantage in the sector.

**Keywords:** Digital Transformation, Fruit and Vegetable Market, Industry 4.0 Technologies, Adoption Model.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual, la adopción de tecnologías de la Industria 4.0 representa un desafío y una oportunidad crucial para las organizaciones que buscan mejorar su competitividad y eficiencia (Abrieu, Basco, Brest López, De Azevedo & López, 2019). A nivel mundial, la digitalización ha transformado sectores tradicionales, y el ámbito agroalimentario no es la excepción (FAO, 2020). Específicamente, los mercados mayoristas frutihortícolas, considerados como eslabones críticos en la cadena de suministro, enfrentan una creciente presión para modernizar sus operaciones y optimizar sus procesos logísticos y de gestión de datos (Castillo, Gligo & Rovira, 2017).

En Argentina, los mercados de este tipo cumplen un rol fundamental en la distribución de productos frescos, pero a menudo operan con métodos manuales y analógicos que limitan su capacidad para responder a las exigencias del mercado. Esta situación se traduce en ineficiencias, pérdida de tiempo en tareas operativas y una alta incidencia de desperdicios alimentarios, que alcanzan aproximadamente **2 millones de toneladas al año dentro de la red frutihortícola**, lo que afecta la sostenibilidad económica y ambiental del sector (FAO, 2020). La ausencia de sistemas estructurados para la gestión de la información impide la toma de decisiones informada, dificultando la planificación y el control de las operaciones diarias (Lomagno, 2022).

La investigación se centra en el caso particular de los operadores frutihortícolas de los mercados abastecedores de la ciudad de Mar del Plata. Estos actores, que gestionan desde la recepción de productos hasta su venta al por menor, se encuentran en una etapa incipiente de la transformación digital. A pesar de reconocer los beneficios potenciales de la tecnología, enfrentan barreras significativas como la falta de recursos financieros, la carencia de conocimiento técnico, la resistencia al cambio y la ausencia de una hoja de ruta clara para la implementación (Abrieu et al., 2019).

En respuesta a esta problemática, el presente trabajo propone un modelo metodológico de cuatro niveles de madurez tecnológica, que sirve como guía para la transición gradual y estructurada hacia la adopción de tecnologías de la Industria 4.0. El modelo busca empoderar a los operadores, facilitando su migración desde un estado inicial analógico hacia una operación completamente digitalizada y automatizada. La metodología se apoya en un diagnóstico del estado actual del sector en Mar del Plata, identificando las tecnologías específicas, las competencias humanas requeridas y las oportunidades de mejora en cada fase de la transición.

El objetivo principal de este trabajo es presentar la metodología y los hallazgos del trabajo final de carrera de dos estudiantes de ingeniería industrial, demostrando cómo un enfoque planificado puede superar los obstáculos y catalizar una transformación que mejore la eficiencia operativa, reduzca las pérdidas y fomente una ventaja competitiva sostenible a largo plazo en el sector frutihortícola de la región.

## 2. CONTEXTO Y METODOLOGÍA.

La transformación digital en los mercados mayoristas frutihortícolas constituye uno de los principales retos para el sector agroalimentario en Argentina y América Latina. En un contexto de alta competitividad, volatilidad de precios y exigencias de transparencia, la adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 no es simplemente una tendencia, sino un imperativo estratégico que habilita la optimización logística, la reducción de pérdidas y el fortalecimiento de la sostenibilidad. Particularmente en ciudades como Mar del Plata, donde los mercados abastecedores cumplen un rol central en la provisión alimentaria, se vuelve fundamental avanzar hacia la digitalización de procesos que históricamente han estado dominados por prácticas manuales y analógicas.

En este marco, se propone un **modelo de niveles de adopción tecnológica**, inspirado en Abrieu et al. (2019), que constituye la base conceptual para analizar la madurez digital de los operadores y guiar la transición hacia un entorno 4.0. El modelo se organiza en **cuatro niveles progresivos**:

- **Nivel 1: Estructura analógica.** Corresponde a operadores que dependen casi exclusivamente de métodos manuales. Los registros de transacciones se realizan en papel, las decisiones se apoyan en la experiencia personal y el acceso a información es limitado. Esta situación conlleva altos niveles de ineficiencia y errores recurrentes en la gestión.
- **Nivel 2: Digitalización incipiente.** En este estadio aparecen las primeras herramientas digitales, como la facturación electrónica (AFIP, 2018), la comunicación mediante aplicaciones de mensajería y el uso básico de bases de datos para almacenar información de clientes o

proveedores. Aunque limitado, este nivel representa un punto de inflexión en la modernización de los procesos.

- **Nivel 3: Optimización de procesos.** Aquí se incorporan tecnologías más avanzadas como softwares de gestión (ERP, CRM), sistemas de inventario digital y almacenamiento en la nube. Los datos empiezan a ser utilizados para tomar decisiones estratégicas, lo que permite mejorar la eficiencia logística y la planificación de la demanda.
- **Nivel 4: Transformación digital plena.** Se alcanza la integración completa de las operaciones mediante herramientas como el Internet de las Cosas (IoT), Big Data y automatización de procesos. Este nivel redefine la estructura operativa, abriendo nuevas formas de negocio y generando una ventaja competitiva sostenible.

Este modelo de niveles no solo ofrece un mapa de ruta para la modernización de los mercados frutihortícolas, sino que también visibiliza las brechas de capacidades y competencias que deben cerrarse en cada fase de la transición.

La justificación de esta transformación se sostiene en un problema estructural: el **desperdicio de alimentos**. Según la FAO (2020), en Argentina se pierden anualmente 16 millones de toneladas de alimentos, de las cuales cerca de 2 millones corresponden a la red frutihortícola. La digitalización y la trazabilidad emergen como herramientas esenciales para mitigar estas pérdidas, al facilitar un control más preciso de inventarios, la predicción de la demanda y la mejora de la coordinación logística.

El contexto también se articula con metodologías de **mejora continua**, en particular con el ciclo PDCA de Deming (1986), que estructura la gestión en cuatro fases: planificar, hacer, verificar y actuar. En la práctica, este ciclo, aplicado junto con tecnologías digitales, permite identificar ineficiencias, evaluar resultados y realizar ajustes dinámicos en las operaciones de los mercados. A la vez, la lógica estratégica del Balanced Scorecard de Kaplan y Norton (1996) facilita traducir la visión de transformación digital en indicadores de desempeño específicos, vinculando objetivos financieros, de procesos, de clientes y de aprendizaje organizacional.

El **marco regulatorio argentino** también actúa como motor de cambio. Normativas como la facturación electrónica (AFIP, 2018), el Documento de Tránsito Vegetal Electrónico (DTVe) y el RENSPA (SENASA) obligan a los operadores a integrar sistemas digitales. Paralelamente, la Ley 25.326 sobre protección de datos personales (Congreso de la Nación, 2000) introduce la necesidad de garantizar seguridad y privacidad en el manejo de información digitalizada, reforzando la confianza en los sistemas.

Desde una perspectiva más amplia, Porter (2008) sostiene que las cinco fuerzas competitivas se reconfiguran en entornos digitalizados: las barreras de entrada se modifican, los costos de transacción se reducen y las cadenas de valor se vuelven más transparentes. En el sector frutihortícola, estas dinámicas permiten a los operadores generar nuevas ventajas competitivas frente a productores, distribuidores y consumidores.

Dentro de la literatura latinoamericana se enfatiza en que la transición hacia la Industria 4.0 debe estar alineada con políticas públicas. Castillo, Gligo y Rovira (2017) destacan que la digitalización en América Latina debe combinar modernización productiva con inclusión y sostenibilidad. Este enfoque resulta fundamental en contextos como Mar del Plata, donde predominan pequeñas y medianas empresas familiares que enfrentan barreras de inversión y capacitación. Como advierte Lomagno (2022), incluso las políticas de estabilización de precios de frutas y verduras requieren información más precisa y oportuna, lo cual refuerza el rol estratégico de la digitalización para fortalecer tanto la gestión empresarial como la política pública.

El estudio entonces integra el **modelo de niveles de adopción tecnológica** con enfoques de sostenibilidad, mejora continua, regulación, competitividad y políticas públicas. El resultado de esta integración es una base conceptual que sostiene la necesidad de transitar desde operaciones analógicas hacia la transformación digital plena, asegurando eficiencia, sostenibilidad y resiliencia en los mercados frutihortícolas.

La metodología de esta investigación se basó en un enfoque mixto, que combinó métodos cualitativos y cuantitativos para obtener una comprensión integral del sector (Hernández Sampieri et al, 2022). La investigación se dividió en tres fases principales: la caracterización del entorno tecnológico actual de los mercados, la identificación de los principales desafíos y oportunidades de mejora, y la validación de la estructura del modelo propuesto.

Se llevaron a cabo entrevistas en profundidad a una muestra representativa de operadores de los mercados de la ciudad de Mar del Plata. El objetivo fue diagnosticar su nivel de madurez tecnológica actual, identificar los principales desafíos y oportunidades de mejora, y validar el modelo. Las herramientas de recolección de datos se diseñaron en función de las cuatro dimensiones de la Industria 4.0: Personas, Procesos, Máquinas (equipamiento) y TIC (ver Tabla 1).

*Tabla 1 - Herramientas de recolección de datos por dimensión tecnológica.*

| Dimensión | **Preguntas Clave** |
|---|---|
| **Personas** | ¿Se gestionan las habilidades duras y blandas del personal? ¿Existen roles definidos para ventas y administración? |
| **Procesos** | ¿Utilizan herramientas digitales para la gestión de datos? ¿Se ha reducido el uso de papel para almacenar información? |
| **Máquinas** | ¿Se analizan las oportunidades de migrar las ventas al mundo digital? ¿Se utilizan dispositivos inteligentes para la gestión de datos? |
| **TIC** | ¿Están todas las actividades conectadas digitalmente? ¿Se utilizan sistemas de gestión para administrar el inventario y las ventas? |

Los datos recopilados permitieron identificar el Nivel en que se encuentran la mayoría de los operadores en los mercados de Mar del Plata y la elaboración de una hoja de ruta para su evolución hacia la transformación digital.

## 3. DESARROLLO.

### 3.1. Descripción de un operador típico

Es posible caracterizar al puesto frutihortícola típico como una unidad de trabajo ubicada dentro de un mercado abastecedor, con una superficie aproximada de 60 a 90 m², que puede variar según la ubicación y la necesidad del operador. Cada puesto suele estar compuesto por un área de recepción y almacenamiento, un espacio de exposición y venta al por mayor y, en algunos casos, cámaras de frío para la conservación. En promedio, un puesto de estas características emplea entre 3 y 5 trabajadores, incluyendo al titular o puestero, personal de carga y descarga, y en ocasiones un administrativo encargado de llevar las cuentas.

Las actividades centrales del puesto giran en torno a cuatro funciones principales: **abastecimiento, ventas, mantenimiento y administración**. El abastecimiento comprende la recepción de mercadería, su descarga y clasificación para almacenamiento. La venta constituye la actividad más relevante, dirigida a clientes mayoristas y minoristas, con dinámicas que dependen del volumen de compra y las relaciones comerciales establecidas. El mantenimiento implica tanto el cuidado de las instalaciones como el control de calidad de los productos, aplicando prácticas como el repaso de frutas y verduras para descartar piezas dañadas. Por su parte, la administración se ocupa del registro de operaciones, deudas, cuentas y reclamos, que en la mayoría de los casos todavía se lleva de manera manual, aunque algunos operadores comienzan a incorporar herramientas digitales.

En términos de infraestructura y equipamiento, el puesto típico dispone de carros, zorras, pallets, bins y cámaras frigoríficas, además de herramientas básicas de mantenimiento. El operador debe dominar conocimientos técnicos vinculados al almacenamiento y la conservación de alimentos, junto con habilidades comerciales de negociación y gestión financiera. Se trata de espacios intensivos en mano de obra, con exigencias físicas importantes y exposición a riesgos laborales por la manipulación constante de cargas y maquinaria.

En la Ilustración 1 se muestran registros fotográficos de varios operadores en sus jornadas habituales de trabajo, donde pueden apreciarse las zonas, equipamiento y dinámicas operativas, como así también los puntos de contacto con el cliente, en puestos de diverso nivel de complejidad y adopción tecnológica.




*Ilustración 1 – Fotos de diversos operadores de los mercados de Mar del Plata. Fuente: Evans & Cecive, 2025*

### 3.2. **Diagnóstico del Nivel de Madurez Tecnológica Actual**

La transformación digital en la cadena de suministro agroalimentaria es un fenómeno global que busca mejorar la eficiencia y la competitividad. Sin embargo, el ritmo y el grado de esta adopción varían significativamente entre los diferentes eslabones y regiones. En este sentido, la presente investigación se propuso caracterizar el estado actual de la digitalización en un eslabón crítico: los operadores frutihortícolas de los mercados abastecedores de la ciudad de Mar del Plata (Tabla 2).

El diagnóstico se realizó a través de un enfoque metodológico mixto, con el fin de obtener una comprensión profunda de las operaciones diarias de los puestos. Los datos recopilados permitieron ubicar a cada operador en el modelo de madurez tecnológica de cuatro niveles, que se describió en la sección anterior.

*Tabla 2 - Principales características técnicas de los mercados de Mar del Plata. Fuente: Evans & Cecive, 2025*

| Mercado | Ubicación | Tamaño | Módulos | Operadores | Ocupación |
|---|---|---|---|---|---|
| **Mercado Procosud S.A.** | Ruta 226, km 7,5 | 22 hectáreas (Grande) | 112 puesteros 40 quinteros | 75 puesteros | 100% |
| **Abasto Central** | Ruta 88, km 3, 3 | 6 hectáreas | No identificado | 85 puesteros Aprox | 75% Aprox |
| **Cooperativa de horticultores** | Chile 1485 | 2 hectáreas | 45 puesteros 60 quinteros | 60 puesteros Aprox | 100% |

Los resultados revelaron una realidad heterogénea, pero con una tendencia clara: **la mayoría de los operadores se encuentra en una etapa de transición entre el Nivel 1 (Analógico) y el Nivel 2 (Digitalización)**. Esta situación se evidencia en el uso predominante de métodos manuales y documentación en papel para la gestión de tareas clave, como el registro de ventas, el control de

inventario y la comunicación con proveedores y clientes. Esta brecha tecnológica refleja la distancia entre las prácticas actuales y el potencial que ofrecen las herramientas de la Industria 4.0 para optimizar la logística, la trazabilidad y la eficiencia de los procesos.

Se observó que los operadores más grandes y con mayor trayectoria, especialmente aquellos que actúan como intermediarios, han comenzado a incorporar herramientas digitales básicas. Sin embargo, su uso es, en la mayoría de los casos, fragmentado y no integrado. Por ejemplo, es común el uso de hojas de cálculo o aplicaciones de mensajería para registrar pedidos, pero esta información no se vincula directamente con la gestión de inventario o con la facturación.

Un hallazgo relevante fue la disposición positiva de los operadores hacia la incorporación de tecnologías digitales, siempre que estas contribuyan a mantener la competitividad y respondan a necesidades concretas de gestión. No obstante, se identificaron importantes barreras que frenan el proceso de adopción: la falta de recursos financieros para invertir en equipamiento, la carencia de tiempo para implementar cambios y el déficit en conocimientos técnicos y de formación específica. Estas limitaciones, sumadas a una cultura organizacional con fuerte arraigo en métodos tradicionales, explican por qué la transición tecnológica se encuentra todavía en fases iniciales.

Por otro lado, los productores que comercializan productos más perecederos como hojas verdes, suelen encontrarse en el Nivel 1. El ritmo acelerado de su operación diaria y la falta de tiempo para implementar nuevas herramientas los mantiene anclados en procesos completamente manuales y analógicos. Esta realidad subraya la necesidad de una solución que sea no solo tecnológicamente avanzada, sino también adaptable y fácil de integrar en operaciones con márgenes de tiempo muy ajustados.

La investigación identificó que la falta de un sistema de gestión integrado es la principal causa de ineficiencias. Las operaciones se caracterizan por una alta incidencia de actividades que no generan valor, como la búsqueda de información en documentos físicos, la doble carga de datos y las comunicaciones ineficientes. Estas tareas, que consumen hasta 150 minutos por día, tienen un impacto directo en la productividad y en la capacidad de respuesta del operador frente a las fluctuaciones del mercado. La implementación de tecnologías 4.0, como sistemas ERP, podría automatizar estas tareas, liberando tiempo para actividades de mayor valor agregado, como la planificación estratégica y la relación con los clientes.

Además, el diagnóstico reveló que la adopción de tecnologías no solo depende de la disponibilidad de herramientas, sino también de las capacidades del personal. Se detectaron brechas en las competencias digitales de los operadores y sus equipos, lo que representa una barrera significativa para la implementación exitosa de cualquier modelo de transformación digital. Por lo tanto, cualquier estrategia de migración debe incluir un componente de formación y capacitación que aborde tanto las habilidades técnicas como las blandas, como la comunicación y la colaboración.

El diagnóstico concluye que el sector frutihortícola de Mar del Plata presenta una madurez tecnológica baja, pero también un potencial de transformación significativo. La combinación de predisposición al cambio y conciencia sobre las ventajas de la digitalización constituye un terreno fértil para diseñar estrategias de acompañamiento que integren capacitación, acceso a recursos y modelos de transición gradual. De este modo, los operadores podrían avanzar hacia niveles superiores de adopción tecnológica, reduciendo desperdicios, mejorando la previsión de la demanda y fortaleciendo su competitividad en un entorno cada vez más exigente.

Los hallazgos de este diagnóstico sientan las bases para la propuesta de nuestro modelo, que busca ofrecer una hoja de ruta práctica para superar estos desafíos y liberar el potencial de crecimiento de este sector.

### 3.3. Identificación de Desafíos y Oportunidades

La identificación de desafíos y oportunidades en el proceso de digitalización de los mercados frutihortícolas se centra en reconocer tanto las limitaciones estructurales como las posibilidades de transformación que ofrece la incorporación de tecnologías 4.0. Uno de los principales **desafíos** es la **resistencia al cambio** cultural y generacional. Las entrevistas realizadas muestran que muchos operadores, especialmente los de mayor edad, encuentran dificultades para adaptarse a nuevas herramientas digitales y manifiestan cierta desconfianza hacia su uso, lo que limita la transición hacia niveles más avanzados de digitalización. A esta barrera cultural se suma la **escasez de recursos**

**financieros y de conocimiento técnico**, que impide a los puesteros invertir en equipamiento adecuado o capacitarse en el uso de nuevas tecnologías.

El diagnóstico tecnológico inicial reveló una serie de desafíos estructurales que impiden a los operadores frutihortícolas de Mar del Plata avanzar hacia niveles de madurez digital más altos. La resistencia al cambio, la percepción de la tecnología como un costo en lugar de una inversión y la falta de un conocimiento técnico adecuado son las principales barreras que limitan la transformación.

La falta de **infraestructura tecnológica y de gestión de datos** constituye otro de los grandes obstáculos. Actualmente, la mayoría de los puestos opera con registros manuales, baja trazabilidad e insuficiente digitalización de la información. Esto genera ineficiencias, como tiempos improductivos, movimientos innecesarios, errores en inventarios, sobreofertas, retrabajos y altos niveles de desperdicio alimentario. Asimismo, se detecta una **debilidad organizativa** vinculada a la escasa capacitación sobre el valor de los datos y la ausencia de hábitos de mejora continua, lo que agrava la resistencia a adoptar metodologías basadas en evidencia.

La investigación identificó que uno de los mayores desafíos operativos es el **tiempo dedicado a actividades que no generan valor**. Los métodos de gestión manuales y basados en papel, como el registro de ventas y el control de inventario, consumen una cantidad significativa de tiempo productivo. En promedio, se estima que los operadores invierten hasta 150 minutos diarios en tareas como la búsqueda de información, la doble carga de datos y las comunicaciones ineficientes.

Esta ineficiencia es la causa raíz de otros problemas, como la **falta de información para la toma de decisiones**. Al no tener datos estructurados y actualizados en tiempo real, los operadores no pueden analizar el rendimiento de sus ventas, identificar tendencias de consumo o gestionar eficazmente el inventario. Esto conduce a decisiones intuitivas que pueden resultar en pérdidas y oportunidades de negocio desaprovechadas.

Sin embargo, el mismo diagnóstico que expuso estos desafíos también reveló oportunidades de mejora significativas a través de la adopción tecnológica. La implementación de un sistema de gestión integrado, como un **ERP (Enterprise Resource Planning)**, representa una oportunidad clave para automatizar tareas repetitivas y liberar el tiempo del personal para actividades de mayor valor. Un ERP permite la gestión centralizada de ventas, clientes, inventario y finanzas, eliminando la necesidad de múltiples registros manuales.

Otra oportunidad se encuentra en la **mejora de la comunicación y la gestión de la cadena de suministro**. La investigación demostró que la comunicación ineficiente con proveedores y clientes a menudo genera errores y demoras. La adopción de plataformas digitales y herramientas de mensajería integradas podría optimizar esta interacción, mejorando la coordinación y la trazabilidad de los productos.

Además, el estudio destaca el potencial de las **tecnologías de análisis de datos**. Una vez que la información de ventas, inventario y clientes es digitalizada, los operadores pueden utilizar herramientas de inteligencia de negocios para obtener información valiosa. Esto les permitiría optimizar la planificación de la demanda, ajustar los precios en función de las fluctuaciones del mercado y ofrecer un mejor servicio al cliente.

El estudio también señala la oportunidad de **responder a las demandas de los clientes**, quienes comienzan a exigir mayor trazabilidad, pedidos en línea y transacciones digitales. Esta presión externa actúa como incentivo para que los operadores incorporen herramientas digitales, al mismo tiempo que se fomenta la competitividad, ya que los primeros en innovar se posicionan como líderes de mercado y generan un efecto de imitación en sus pares.

En definitiva, la transición digital no es solo una cuestión de modernización, sino una necesidad estratégica para los operadores que buscan una ventaja competitiva sostenible. Al superar los desafíos identificados y aprovechar las oportunidades que ofrecen las tecnologías 4.0, estos negocios pueden transformar sus operaciones, reducir costos y mejorar su capacidad de respuesta en un mercado cada vez más exigente.

### 3.4. Modelo de Adopción y Requisitos para la Implementación

Con base en el diagnóstico de los mercados frutihortícolas de Mar del Plata se propone un **modelo metodológico estructurado** para guiar a los operadores en su transición hacia la Industria 4.0. Este

modelo se articula en torno a los cuatro niveles de madurez tecnológica previamente definidos y se presenta como una hoja de ruta práctica, con el objetivo de facilitar una adopción gradual y exitosa.

El modelo propone una transición organizada, donde cada nivel de avance tecnológico requiere la implementación de herramientas, la capacitación del personal y la optimización de procesos. A continuación, se detallan los requisitos de cada nivel:

- **Nivel 1: Analógico (Punto de Partida)**: La primera fase consiste en una autoevaluación honesta del estado actual. Aquí, el enfoque está en la **estandarización de procesos manuales** para que sirvan de base para la futura digitalización. Los requisitos principales son:
  - **Procesos**: Formalizar los flujos de trabajo clave, como el registro de ventas y el control de inventario, utilizando formatos en papel estandarizados.
  - **Personas**: Capacitar al personal en la importancia de un registro de datos preciso.
  - **TIC**: Evaluar las opciones de hardware básico (computadoras, dispositivos móviles) que pueden ser introducidos.
- **Nivel 2: Digitalización (El Primer Paso)**: En esta fase, el objetivo es **reducir la dependencia del papel** y comenzar a capturar datos de manera digital. Los requisitos clave incluyen:
  - **TIC**: Implementar herramientas básicas como hojas de cálculo, aplicaciones de mensajería y correos electrónicos para gestionar pedidos y comunicación.
  - **Procesos**: Convertir los registros manuales a formatos digitales, lo que facilita el almacenamiento y la consulta de la información.
  - **Personas**: Formar al personal en el uso de estas herramientas, enfatizando su rol en la mejora de la eficiencia.
- **Nivel 3: Optimización de Procesos (Consolidación)**: Este es el punto de inflexión. El foco se traslada de la simple digitalización a la **integración de datos y la automatización de tareas**.
  - **TIC**: La principal recomendación es la implementación de un **sistema de gestión integrado (ERP)**. Esta herramienta centraliza las ventas, el inventario, los clientes y las finanzas, eliminando la duplicación de datos y las ineficiencias.
  - **Procesos**: Se busca optimizar los flujos de trabajo, automatizando las tareas repetitivas para liberar tiempo que puede ser dedicado a la estrategia y el crecimiento del negocio.
  - **Personas**: El personal debe adquirir habilidades más avanzadas en el uso del ERP y en el análisis básico de datos para tomar decisiones más informadas.
- **Nivel 4: Transformación Digital (Vanguardia Competitiva)**: En este nivel, la tecnología se convierte en un habilitador estratégico para la toma de decisiones basada en datos. Los requisitos son:
  - **TIC - Tecnología 4.0**: Integración de tecnologías avanzadas como el **análisis de Big Data, la inteligencia artificial y el Internet de las Cosas (IoT)**. Los datos fluyen en tiempo real, permitiendo la predicción de la demanda, la optimización de precios y la automatización de la cadena de suministro.
  - **Procesos**: Los flujos de trabajo son completamente digitales y autónomos, lo que permite una respuesta ágil a las fluctuaciones del mercado.
  - **Personas**: El personal se enfoca en la interpretación de datos y en la toma de decisiones estratégicas, con un enfoque en la innovación y la mejora continua.

El modelo propuesto no solo aborda los desafíos tecnológicos, sino que también reconoce la importancia del capital humano y los procesos operativos. Al ofrecer una hoja de ruta clara, los operadores pueden realizar una transición gradual y medida, asegurando que la inversión en tecnología genere un retorno significativo en términos de eficiencia, competitividad y sostenibilidad a largo plazo.

Para asegurar la implementación exitosa en cada nivel, el modelo establece **requisitos transversales**: la realización de diagnósticos iniciales del estado tecnológico de cada operador, la definición de objetivos medibles y alcanzables, la capacitación continua del personal en competencias digitales, el compromiso de la gestión directiva con la innovación y el uso de metodologías de mejora continua

como el ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar). Este último elemento permite evaluar la efectividad de cada implementación y realizar los ajustes necesarios, asegurando que el tránsito hacia la digitalización se dé de manera ordenada, sostenible y adaptable al contexto.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El relevamiento empírico realizado en los mercados abastecedores de Mar del Plata —Procosud S.A., Abasto Central y la Cooperativa de Horticultores— permitió diagnosticar el **nivel de madurez tecnológica de los operadores frutihortícolas**. Los resultados muestran que la **mayoría de los puestos se encuentran en los niveles 1 y 2** del modelo de adopción tecnológica, caracterizados por un predominio de prácticas analógicas y una digitalización incipiente (Evans & Cecive, 2025). En estos niveles, las operaciones se sostienen en registros manuales, comunicación tradicional y un uso mínimo de herramientas digitales básicas como la facturación electrónica o la mensajería instantánea. Un número reducido de operadores alcanzó parcialmente el nivel 3, vinculado a la optimización mediante softwares de gestión e inventarios, mientras que ninguno de los encuestados alcanzó el nivel 4 de transformación digital plena.

En términos cuantitativos, el estudio relevó un total de **118 operadores** distribuidos en los tres mercados (51 en Procosud, 41 en Abasto Central y 26 en la Cooperativa de Horticultores), muestra que representa más del 40% de los operadores activos y cuyas características principales se resumieron en la Tabla 2. A partir de las entrevistas realizadas, se pudo constatar que, si bien existe una **predisposición positiva hacia la digitalización**, la **falta de recursos financieros, de conocimiento técnico y de tiempo** se presentan como las principales barreras para avanzar hacia fases más avanzadas de adopción. Estos hallazgos refuerzan la idea de que el proceso de transición requiere no solo de inversión en infraestructura, sino también de estrategias de capacitación continua y acompañamiento organizacional.

Se encontró además que la **ausencia de datos estructurados** limita la capacidad de los operadores para tomar decisiones estratégicas. Por ejemplo, no pueden analizar el desempeño de ventas por producto, identificar tendencias estacionales o gestionar el inventario de manera proactiva.

La discusión de estos resultados revela que la **brecha tecnológica** en los mercados frutihortícolas locales está vinculada tanto a factores estructurales como culturales. En el plano estructural, la **insuficiente infraestructura tecnológica y de gestión de datos** genera ineficiencias operativas: tiempos improductivos, movimientos innecesarios, sobreofertas, faltantes de stock, errores en inventarios y elevados niveles de desperdicio alimentario. Estos resultados coinciden con estimaciones nacionales que señalan que cerca de **2 millones de toneladas de frutas y hortalizas se pierden cada año en Argentina** dentro de la red frutihortícola (FAO, 2020), lo que resalta la urgencia de incorporar herramientas de trazabilidad y análisis de datos.

Desde la perspectiva cultural, la **resistencia al cambio** se manifiesta principalmente entre operadores de mayor edad, quienes expresan desconfianza hacia las nuevas tecnologías y se muestran reacios a modificar prácticas consolidadas. No obstante, también se identificó un segmento de operadores más jóvenes o con mayor contacto con la tecnología que reconocen el valor de la digitalización y se muestran dispuestos a incorporarla siempre que esté vinculada a mejoras de competitividad y rentabilidad.

En cuanto a las **oportunidades identificadas**, el estudio destaca que la digitalización permitiría mejorar la eficiencia logística, optimizar el uso de recursos y reducir desperdicios. Se subraya, además, la posibilidad de **incorporar nuevas modalidades de comercialización**, como plataformas de pedidos en línea, y de responder a la creciente demanda de los consumidores por mayor trazabilidad y transparencia en los productos. La digitalización, en este sentido, no solo aporta valor operativo, sino que también puede convertirse en un factor diferenciador y competitivo en el mercado.

Asimismo, se identificaron importantes oportunidades para la adopción tecnológica. El simple paso de formalizar y digitalizar los procesos, como se propone en el Nivel 2, permitiría a los operadores comenzar a recolectar información de manera más eficiente. Esta información, una vez organizada y analizada, se convierte en un activo invaluable para la toma de decisiones.

Avanzar hacia el Nivel 3, con la implementación de un sistema ERP, representa la mayor oportunidad para una optimización a gran escala. Esto no solo elimina la duplicación de datos, sino que también centraliza toda la operación en una única plataforma, lo que permite una visibilidad en tiempo real de las ventas, el inventario y las finanzas. Esto, a su vez, sienta las bases para una ventaja competitiva sostenible.

Los resultados muestran que el **estado actual de la madurez tecnológica es bajo**, pero la existencia de predisposición al cambio y la presión externa de los consumidores y del entorno competitivo configuran un escenario favorable para la transición hacia modelos digitales. La discusión evidencia que la clave no radica únicamente en la adquisición de equipamiento, sino en la articulación de **inversión, capacitación y cambio cultural** como ejes fundamentales para superar las barreras actuales y aprovechar las oportunidades que ofrece la digitalización.

### 4.1. Validación del Modelo

En el proceso de **validación del modelo**, se trabajó con una muestra representativa de operadores de los tres principales mercados mayoristas de Mar del Plata: **Procosud S.A. (51 puestos), Abasto Central (41 puestos) y la Cooperativa de Horticultores (26 puestos)**. En total se relevaron **118 puestos**, lo que permitió abarcar una porción significativa de la población de operadores de la ciudad (ver Tabla 3).

*Tabla 3 – Representatividad de la muestra. Fuente: elaboración propia.*

| Mercado | Operadores | Entrevistados | Representatividad |
|---|---|---|---|
| **Procosud S.A.** | 75 | 51 | 68% |
| **Abasto Central** | 85 | 41 | 48% |
| **Cooperativa de Horticultores** | 60 | 26 | 43% |

Para la validación del modelo propuesto se trabajó con una estrategia de entrevistas semiestructuradas a referentes de los mercados mencionados. Los resultados de la validación fueron altamente positivos. El 90% de los expertos y operadores consultados consideraron que el modelo es una herramienta útil y relevante para guiar la transición digital del sector (se entrevistaron 10 referentes seleccionados de forma intensional). Destacaron su claridad y practicidad, señalando que ofrece una hoja de ruta necesaria para superar los desafíos tecnológicos actuales. Las principales sugerencias de mejora se centraron en la necesidad de acompañamiento y capacitación continua para el personal, lo que reafirma la importancia del factor humano en la transformación digital (Evans & Cecive, 2025).

## 5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FUTURAS.

Este estudio ha demostrado que, a pesar de la creciente digitalización global, los operadores frutihortícolas en los mercados abastecedores de Mar del Plata aún se encuentran en las etapas iniciales de adopción de tecnologías de la Industria 4.0. El análisis de los resultados revela que la mayoría de estos negocios operan con métodos manuales y analógicos, lo que los expone a ineficiencias, desperdicio de alimentos y pérdida de competitividad. La brecha tecnológica observada no responde únicamente a la falta de acceso a tecnologías, sino que está asociada también a limitaciones financieras, carencias en la capacitación técnica del personal y a una resistencia cultural que dificulta el cambio organizacional.

Para abordar estas dificultades, la propuesta de un modelo de adopción de cuatro niveles (Analógico, Digitalización, Optimización y Transformación Digital) se posiciona como una herramienta práctica y escalable. Este modelo no solo define las herramientas tecnológicas necesarias en cada fase, como la incorporación de sistemas de gestión (ERP) o plataformas de trazabilidad, sino que también enfatiza el papel del capital humano, la formación continua y la estandarización de procesos como pilares fundamentales para una transición exitosa. Su implementación permitiría reducir actividades que no generan valor, mejorar la productividad y la rentabilidad, y, de manera crítica, disminuir las pérdidas de alimentos en la cadena frutihortícola, contribuyendo a un sistema más eficiente y sostenible.

A futuro, esta investigación abre la puerta a nuevas líneas de estudio. Se recomienda la aplicación de este modelo en otros mercados de Argentina y de la región para validar su aplicabilidad en contextos diversos. Asimismo, sería de gran valor explorar el impacto a largo plazo de la digitalización sobre toda la cadena de suministro, incluyendo la interacción entre operadores, productores y consumidores.

También se plantea la conveniencia de profundizar en metodologías de implementación, como el ciclo PDCA y enfoques ágiles, que favorecen procesos iterativos y adaptativos en la incorporación de tecnologías. Las tecnologías de la Industria 4.0 representan una oportunidad estratégica para el apalancamiento del sector frutihortícola, y el modelo propuesto ofrece una guía para que los operadores puedan capitalizar este potencial, construyendo negocios más resilientes, competitivos y sostenibles.

## 6. REFERENCIAS.


Abrieu, R., Basco, A. I., Brest López, C., De Azevedo, B., & López, C. B. (2019). *Travesía 4.0: Hacia la transformación industrial argentina*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID), INTAL, CIPPEC y UIA. http://repositorio.cedes.org/handle/123456789/4621

Administración Federal de Ingresos Públicos [AFIP]. (2018). *Resolución General Nº 4290/2018: Comprobantes electrónicos*. Boletín Oficial de la República Argentina.

Castillo, M., Gligo, N., & Rovira, S. (2017). *La política industrial 4.0 en América Latina*. En Cimoli, M., Castillo, M., Porcile, G. & Stumpo, G. (Eds.), *Políticas industriales y tecnológicas en América Latina* (pp. 549-572). Santiago: Naciones Unidas.

Cecive, M. J., & Evans, E. (2025). *Modelo de adopción de tecnologías 4.0 para operadores frutihortícolas de mercados abastecedores de la ciudad de Mar del Plata*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina.

Congreso de la Nación Argentina. (2000). *Ley Nº 25.326: Protección de los datos personales*. Buenos Aires: Boletín Oficial.

Deming, W. E. (1986). *Out of the Crisis*. MIT Press.

FAO (2020). El estado de los mercados de productos básicos agrícolas 2020. Los mercados agrícolas

y el desarrollo sostenible: cadenas de valor mundiales, pequeños agricultores e innovaciones digitales. Roma, FAO. https://doi.org/10.4060/cb0665es

Hernández Sampieri, R., Mendoza Torres, C. P., & Baptista Lucio, P. (2022). *Metodología de la investigación* (7.ª ed.). México: McGraw-Hill Education.

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1996). *The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action*. Harvard Business Press.

Lomagno, N. (2022). *El gobierno avanza con una canasta de frutas y verduras para estabilizar los precios*. Tiempo Argentino. https://www.tiempoar.com.ar/economia/el-gobiernoavanza-con-una-canasta-de-frutas-y-verduras-para-estabilizar-los-precios

Porter, M. E. (2008). *The Five Competitive Forces That Shape Strategy*. *Harvard Business Review*.

Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria [SENASA]. (2020). *Normativas de trazabilidad y control en el sector frutihortícola*. SENASA.

# “Capacidades Dinámicas y Lean Management para la Innovación Incremental en Pymes de Manufactura”

*Cohen, Rodolfo Saúl.*

*Mantulak, Mario José.*

*Laboratorio GTEA, Ing. Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones.*

*Juan Manuel de Rosas 325, Oberá (3360), Misiones.*

*rsaulcohen@gmail.com/saulcohen@fio.unam.edu.ar; mmantulak@gmail.com*

**RESUMEN**

En un contexto de alta competitividad y transformación industrial, las Pymes manufactureras enfrentan el desafío de innovar sus procesos con recursos limitados. Este trabajo propone una metodología integradora entre Lean Management y el enfoque de capacidades dinámicas, aplicada a una empresa metalmecánica de Misiones, Argentina, con el fin de impulsar la innovación y mejorar el desempeño productivo. El objetivo del trabajo es presentar una metodología integradora entre el enfoque Lean Management y las Capacidades Dinámicas, para contribuir a la innovación incremental de procesos enfocada en las Pymes de manufactura en la provincia de Misiones, Argentina. A través del método de estudio de caso, se logró analizar en profundidad los procesos productivos, identificar actividades que no agregaban valor y aplicar herramientas Lean y la estandarización de procesos y rutinas. La empresa logró iniciar el desarrollo de capacidades dinámicas, comenzando por la adaptación y avanzando hacia la absorción de conocimiento externo. Esta experiencia demuestra que, incluso en contextos de recursos limitados, es posible iniciar procesos de transformación profunda, constituyendo una base sólida para futuras investigaciones en Pymes similares. Además ofrece ideas, pautas iniciales para profundizar en las relaciones identificadas, contribuyendo a una validación empírica más robusta que pueden orientar futuras investigaciones.

**Palabras Claves:** Lean Management; Capacidades Dinámicas; Innovación de Procesos; Pymes metalmecánicas.

**ABSTRACT**

In a context of high competitiveness and industrial transformation, manufacturing SMEs face the challenge of innovating their processes with limited resources. This paper proposes an integrative methodology combining Lean Management and the dynamic capabilities approach, applied to a metalworking company in Misiones, Argentina, with the aim of driving innovation and improving production performance. The objective of this paper is to present an integrative methodology combining the Lean Management approach and Dynamic Capabilities to contribute to incremental process innovation focused on manufacturing SMEs in the province of Misiones, Argentina. Through the case study method, it was possible to analyze production processes in depth, identify non-value-added activities, and apply Lean tools and standardize processes and routines. The company was able to initiate the development of dynamic capabilities, starting with adaptation and moving toward the absorption of external knowledge. This experience demonstrates that, even in contexts of limited resources, it is possible to initiate profound transformation processes, constituting a solid foundation for future research in similar SMEs. It also offers ideas and initial guidelines for exploring the identified relationships in more depth, contributing to a more robust empirical validation that can guide future research.

**Keywords:** Lean Management; Dynamic Capabilities; Process Innovation; Metalworking SMEs.

## 1.INTRODUCCIÓN

En un entorno industrial marcado por una competencia creciente y una demanda constante de mayor eficiencia, las organizaciones se ven impulsadas a innovar y optimizar sus procesos para mantenerse competitivas. La innovación en los procesos de manufactura ha adquirido una relevancia estratégica, especialmente en aquellas industrias que buscan mejorar la calidad, reducir costos y tiempos de producción, y aumentar su flexibilidad frente a los cambios del mercado. En este contexto, las metodologías de Lean Manufacturing se consolidan como herramientas clave, al permitir una gestión eficiente de los recursos, la minimización de desperdicios y la maximización del valor entregado al cliente (Navarrete Guasgua, 2025).

En la actualidad cada vez más las organizaciones de desarrollo de bienes y servicios buscan un factor diferenciador, que les permita ofrecer a sus clientes productos de calidad, reduciendo sus costos e incrementando su productividad con el objetivo de agregar más valor, mejorando su productividad y competitividad. Esto se logra mediante la implementación de modelos de gestión que persiguen fundamentalmente la eficiencia en el uso de sus recursos y la competitividad para su desarrollo en el mercado. En el contexto argentino actual, estos modelos integran la transformación digital y la gestión de la innovación como elementos clave para optimizar procesos y fortalecer la capacidad de respuesta ante un mercado globalizado y dinámico. Esta transformación implica cambios estructurales integrales dentro de una organización, que van más allá de la mera adopción de tecnología para lograr eficiencia operacional, flexibilidad y personalización (Ribas et al., 2024).

La innovación en procesos se refiere a la introducción de nuevos métodos de producción o distribución, incluyendo a nuevos medios para el manejo de bienes. También pueden consistir en la compra de material y equipo que incorporan nueva tecnología. Uno de sus principales objetivos es la reducción de costos unitarios de productos, que puede ser alcanzada con maquinaria nueva y el conocimiento que ésta contiene, además de mantener o incrementar la calidad de los productos (Palacio-Fierro et al., 2017).

A continuación mencionamos distintas metodologías y herramientas para gestionar la innovación en los procesos operativos, utilizados en la actualidad para la conducción de las empresas, con enfoque en la eficiencia en el uso de sus recursos y la competitividad para su desarrollo en el mercado. La actividad productiva que desarrolla una empresa debe estar organizada de manera que logre los objetivos previstos, optimizándolos en lo posible, técnica y económicamente con el empleo de los sistemas de gestión adecuados y más avanzados.

El modelo de gestión Lean (esbelto), permite organizar y gestionar el desarrollo de productos, servicios, operaciones, proveedores y las relaciones con los clientes, de manera que se utilice menos esfuerzo, menos espacio, menos capital, menos material y menos tiempo, para hacer productos o servicios con menos defectos, menos problemas y de acuerdo con las necesidades del cliente. Como idea central un sistema de gestión Lean Management propone crear más valor con menos recursos (Lluís Cuatrecasas, 2016).

En términos generales, existe una tendencia de aplicar Lean para la solución de problemas de fabricación en la industria moderna. Las herramientas Lean son adaptables a los requerimientos de las empresas, permiten la excelencia operacional a partir de la articulación de sus principios con las necesidades tecnológicas y de innovación de los sistemas de fabricación (Pinzón et al., 2018).

Lean Manufacturing se define como una filosofía de trabajo, basada en las personas, que define la forma de mejora y optimización de un sistema de producción focalizándose en identificar y eliminar todo tipo de “desperdicios”, que se observan en la producción: sobreproducción, tiempo de espera, transporte, exceso de procesado, inventario, movimiento y defectos (Matías & Idoipe, 2013). De acuerdo a Krajewski and Malhotra (2022) los sistemas esbeltos abarcan la estrategia de operaciones, diseño de procesos, administración de la calidad, administración de restricciones, diseño de la distribución física, diseño de la cadena de suministro, gestión de la tecnología e inventarios de una empresa, y puede usarse tanto en empresas de servicios como manufactureras.

Otra metodología ampliamente utilizada principalmente en la búsqueda de la innovación en mediante el enfoque estratégico de las Capacidades Dinámicas. Las empresas necesitan lograr ventajas competitivas, es decir, características que las diferencien de sus competidores y les permitan colocarse en una posición relativa superior para competir. La forma de generar ventajas competitivas sostenibles viene dada por las habilidades de las organizaciones para gestionar sus recursos en entornos cambiantes, es decir, por sus capacidades dinámicas (Díaz et al., 2023).

La dinámica de los mercados exige que las organizaciones desarrollen nuevas capacidades y las utilicen para el desarrollo de productos, servicios y procesos innovadores que les permitan obtener ventajas competitivas. Si la innovación es de proceso (introducción de un cambio significativo en la tecnología de producción de un bien o servicio) se logrará obtener una ventaja competitiva de liderazgo

en costes y si es de producto o servicio (introducción en el mercado de nuevos o significativamente mejorados productos o servicios) se conseguirá una ventaja competitiva de diferenciación de producto o servicio (Trillo-Holgado et al., 2022).

La literatura sobre capacidades dinámicas ha crecido muchísimo desde los primeros trabajos de Teece et al. (1997), manifestando que requieren las habilidades empresariales y de liderazgo de la alta gerencia. La teoría de las capacidades tiene un vínculo estrecho con la teoría de los recursos Penrose (1959), definiendo a los recursos como todos aquellos activos, capacidades, procesos organizacionales, atributos, información, conocimientos, etc. que la empresa controla y con los cuales establece estrategias para mejorar su productividad. Siendo clave la identificación de recursos al estar relacionada con el desarrollo de las capacidades (Quintero Sepúlveda et al., 2021).

Definimos las capacidades dinámicas como la orientación conductual de una empresa para integrar, reconfigurar, renovar y recrear constantemente sus recursos y capacidades y lo más importante, actualizar y reconstruir sus capacidades centrales en respuesta al entorno cambiante para lograr y mantener una ventaja competitiva (Danneels, 2002; Helfat & Peteraf, 2003; Wang & Ahmed, 2007). El término “dinámica” se refiere aquí a la capacidad de renovar competencias en entornos cambiantes, y el término “capacidades” se refiere a la habilidad estratégica para redefinir y mejorar habilidades, recursos y competencias funcionales de modo que respondan efectivamente a las nuevas necesidades (Teece et al., 1997).

Según comenta López-Torres et al. (2016) en la literatura existente se manifiesta un claro consenso entre investigadores y académicos de que la mayoría de las Pymes realizan actividades de innovación es totalmente diferentes a las que efectúan las grandes empresas, y se están orientando cada vez más en la realización de actividades de colaboración con otras empresas, clientes y proveedores. Por lo tanto, las actividades de innovación de las Pymes por lo general se enfocan más en las primeras etapas de la innovación, consistentes en la búsqueda de recursos económicos, financieros y tecnológicos para hacer más efectivas y eficientes a las organizaciones, los cuales se pueden obtener a través de las actividades de colaboración con otras empresas y con sus mismos proveedores.

En Argentina de acuerdo a Rojo et al. (2020), las Pymes que se dedican a la manufactura enfrentan diversas dificultades que limitan su capacidad de crecimiento y competitividad. En primer lugar, estas empresas suelen apostar fuertemente por la adquisición de tecnología importada, como maquinaria, pero tienen una menor preocupación por desarrollar internamente actividades que fomenten la innovación real, tales como la investigación, el desarrollo de proyectos propios o la capacitación técnica de su personal.

En cuanto a la gestión interna, estas firmas suelen tener una baja formalización administrativa y organizacional. La mayoría están bajo dirección familiar sin procesos escritos ni estandarizados, lo que limita la profesionalización y el crecimiento ordenado. Asimismo, se observan problemas en la formalización de los puestos de trabajo, con dificultades para regularizar la plantilla de empleados y para implementar una capacitación continua. En este escenario, las Pymes manufactureras se ven obligadas a innovar sus procesos operativos, reestructurar, adaptar y reconfigurar sus sistemas productivos y reorientar sus estrategias, concentrando sus esfuerzos en responder con precisión a las exigencias del entorno y a las oportunidades del mercado (Arcentales et al., 2022).

En el contexto previamente descrito, la situación problemática indica que se torna indispensable avanzar en la investigación científica que contribuya a la innovación de los procesos en las Pymes de la región, para posibilitar el mejoramiento de su desempeño productivo. Sin embargo, aún es limitado el conocimiento sobre cómo estas técnicas influyen en la capacidad de una organización para innovar sus procesos de manufactura.

Esto permite definir como objetivo del trabajo, es presentar una metodología integradora entre el enfoque Lean Management y las Capacidades Dinámicas, para contribuir a la innovación de procesos enfocada en las Pymes de manufactura y en la provincia de Misiones, Argentina, para contribuir el mejoramiento de su desempeño productivo. En otras palabras, se requiere comprender en qué medida la implementación de Lean Management facilita o potencia la adopción de las capacidades dinámicas que faciliten las prácticas innovadoras que transformen la manera en que las organizaciones producen bienes y servicios.

## 2. METODOLOGÍA

El método de estudio de caso es una herramienta valiosa de investigación, y su mayor fortaleza radica en que a través del mismo se mide y registra la conducta de las personas involucradas en el fenómeno estudiado. Además, en el método de estudio de caso los datos pueden ser obtenidos desde una variedad de fuentes, tanto cualitativas como cuantitativas; esto es, documentos, registros de archivos, entrevistas directas, observación directa, observación de los participantes e instalaciones u objetos físicos (Carazo, 2006). De acuerdo a Canta Honores and Quesada Llanto

(2021) las ventajas que ofrece el método de estudio de caso, se destaca su versatilidad, así como la estructura que aporta para explorar una variedad de problemas, lo que lo convierte en un método apropiado para iniciar un estudio exploratorio..
El estudio inicial se realiza en una empresa metalmecánica ubicada en la ciudad de Posadas provincia de Misiones, la cual realiza proyectos en la cual diseña, fabrica y realiza instalaciones metalmecánicas. La facilidad de acceso a la empresa de forma tan profunda y durante largo tiempo hizo especialmente adecuado este método de investigación. Sin embargo, no podemos obviar que se trata de un caso único en el que es difícil extraer conclusiones teóricas contundentes.

### 2.1 Filosofía Lean y su relación con la innovación en procesos

Lean Manufacturing, como enfoque sistémico de gestión, desempeña un papel fundamental en el mejoramiento continuo de la productividad en entornos industriales y organizacionales. Al adoptar los principios y prácticas de Lean, las empresas pueden identificar y eliminar de forma proactiva las actividades que no agregan valor, optimizar los procesos existentes y fomentar una cultura de mejora constante en todos los niveles de la organización (Valencia Jarama et al., 2025).
Se basa en la reducción de los recursos innecesarios y la eliminación de los retrasos en las operaciones de la fábrica. El término Lean (esbelto) aplicado a un sistema productivo significa “flexible”, fue introducido por primera vez por dos importantes libros: The machine that changed the world, de James Womack, Daniel Jones y Daniel Roos; y Lean Thinking, de James Womack y Daniel Jones (Lluís Cuatrecasas, 2016).
Los principales objetivos de Lean Manufacturing son asegurar tiempos adecuados, garantizar que no existan fallas, garantizar que las fallas sean solucionadas y optimizar todos los recursos. Otros sostienen que el objetivo debe ser implementar esta herramienta para mejorar de forma continua la productividad de las empresas y erradicar toda improductividad. Entre las características más relevantes de Lean Manufacturing se encuentran: brindar seguridad y calidad del producto, disminuir los tiempos de los cambios y variaciones, así como reducir las averías (Sarria Yépez et al., 2017).
Es importante destacar el uso de Lean Manufacturing como herramienta para diagnosticar, operativizar y hacer seguimiento de los productos que proporciona la empresa. Para ello, también deben aplicarse otras herramientas como 5S, que asegura el orden y la limpieza en la realización de actividades, SMED, que permite la reducción de tiempos en los procesos y maquinarias, y TPM, que emplea métodos y acciones dirigidas al mejoramiento de los procesos de mantenimiento necesarios para la productividad de las empresas (Valencia Jarama et al., 2025). Los sistemas esbeltos abarcan la estrategia de operaciones, diseño de procesos, administración de la calidad, administración de restricciones, diseño de la distribución física, diseño de la cadena de suministro, gestión de la tecnología e inventarios de una empresa, y puede usarse tanto en empresas de servicios como manufactureras (Krajewski, 2013).
De acuerdo a lo que comenta Locher (2017) el trabajo estandarizado es una de las bases del pensamiento Lean, es el mejor medio conocido para realizar una actividad de forma eficaz y eficiente. Otra de las cosas es que el trabajo estandarizado define la secuencia deseada de pasos, el tiempo necesario para dar los pasos y otros elementos que aseguren que una determinada actividad se lleva a cabo de forma regular a lo largo del tiempo. Valencia Jarama et al. (2025) destacan que el trabajo estandarizado no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también facilita la implementación de procesos de mejora continua, al proporcionar una base estable sobre la cual se pueden identificar y eliminar desperdicios.
Lean Manufacturing (Manufactura esbelta) es una metodología que se enfoca en la eliminación de cualquier tipo de pérdidas, temporal, material, eficiencia o procesos. Es eliminar lo inútil con el objetivo de aumentar la productividad y la capacidad de la empresa para competir con éxito en el mercado (Vargas-Hernández et al., 2016). El objetivo de Lean Manufacturing es proponer mejoras en los procesos a través del análisis de la cadena de valor, y la implementación de herramientas de calidad e indicadores macro (Rueda, 2007).
El pensamiento Lean se basa, por tanto, en identificar todo aquello que añade valor al cliente y eliminar todo aquello que no lo hace (muda o desperdicio), además de que todo el proceso fluya de forma alineada (flujo de valor). Para hacer referencia al desperdicio y el despilfarro en Toyota utilizaron terminologías distintas: Muda, Muri y Mura. A través de la primera expresaban todos aquellos desperdicios que se producen en nuestros procesos y que Ohno categorizó en 7 tipologías que expondremos más adelante. El término Muri viene a expresar todo aquello que implica sobrecarga en los procesos, y, por último, Mura expresa toda la variabilidad que puede tener el sistema productivo, tanto de maquinaria, materiales, personas, etc. (Cortés Rodríguez, 2023).
Los principios de Lean fueron codificados por Womack y Jones (1996) en torno a cinco ideas que

pretenden la entrega de valor a los clientes de una manera eficiente. En primer lugar, especificar de manera precisa qué es aquello de un producto que crea valor desde la perspectiva del cliente; segundo, identificar, estudiar y mejorar la corriente del valor del proceso para cada producto; el tercero, asegurarse de que el flujo del proceso sea simple, uniforme y libre de errores, evitando con ello el desperdicio; el cuarto, producir sólo lo que el cliente requiere y el quinto, esforzarse en la perfección, lo que implica una mejora continua de todos los procesos (Garcia Palao, 2025).

### 2.2 Las Capacidades Dinámicas y su influencia con la innovación en procesos

De acuerdo a Batista Mota et al. (2017), los cuales mencionan que el enfoque de las capacidades dinámicas surgió en la década de 1990 en el sector privado, particularmente de los trabajos pioneros de Teece et al. (1997). Por su parte Narayan et al. (2023) destacan que el enfoque amplió el argumento de la visión basada en recursos, de crear recursos valiosos, raros, preventivos e imperfectamente sustituibles, renovando los recursos existentes en “entornos cambiantes”. En términos más precisos, el enfoque de capacidades dinámicas explica cómo las empresas pueden adaptarse a los cambios en el entorno para mantener o desarrollar ventajas competitivas (Ambrosini & Bowman, 2009).

En el ámbito de las capacidades dinámicas, se definen como la habilidad distintiva de las organizaciones para integrar, construir y reconfigurar competencias internas y externas (Teece et al., 1997). Esta perspectiva fundamental en gestión empresarial ha evolucionado a lo largo del tiempo, siendo considerada un concepto crucial para la adaptación, innovación y rendimiento empresarial (Sánchez et al., 2022).

De acuerdo a Helfat (1997) profundiza el concepto, al definir las capacidades dinámicas como un conjunto específico de competencias organizativas, permitiendo a las empresas generar y adaptar recursos internos para responder eficazmente a cambios en el mercado. La visión de Eisenhardt and Martin (2000) se centra en rutinas organizativas y estratégicas como respuesta flexible y adaptativa ante dinámicas cambiantes. Mientras que Zollo and Winter (2002) añaden un matiz, describiendo las capacidades dinámicas como patrones aprendidos y estables de actividad colectiva, destacando la capacidad de optimización y mejora continua.

Por su parte Teece (2007) señala la importancia de estas capacidades para la innovación, son rutinas específicas, por medio de aprendizaje; mientras que para Eisenhardt and Martin (2000), son patrones adaptativos emergentes. Mientras que Grant (1991) y Eisenhardt and Martin (2000) definen a las capacidades dinámicas como hábitos estratégicos de la organización mediante los cuales realiza nuevas configuraciones de sus recursos para seguir el ritmo del mercado. A diferencia de las capacidades tradicionales (Capacidades organizativas u ordinarias) es que estas últimas están orientadas a operaciones estáticas, rutinarias, con resultados a corto plazo y son menos flexibles frente a cambios.

De este modo, las Pymes pueden mejorar continuamente su competitividad mediante pequeños avances, responder eficazmente a las demandas del mercado y a los desafíos específicos de la industria manufacturera, y alcanzar altos niveles de desempeño y ventaja competitiva. En este contexto, estas capacidades son cruciales para la supervivencia y crecimiento de las Pymes en mercados dinámicos, ya que facilitan la innovación en productos y procesos, aprendizaje organizacional y generación de ventajas competitivas sostenibles (Garzón Castrillón, 2015).

### 2.3 La relación entre capacidades dinámicas y Lean para la innovación en Pymes

La filosofía Lean puede considerarse una manifestación práctica y metodológica de las capacidades dinámicas, pues ambas requieren: detección y aprovechamiento de oportunidades para innovar procesos. Reconfiguración de recursos y procesos para mantener la ventaja competitiva y adaptarse a entornos cambiantes. Aprendizaje organizacional continuo para optimizar y estandarizar mejoras.

El enfoque Lean se considera una estrategia empresarial integral que rechaza la separación entre pensamiento y acción, es decir, entre la formulación de la estrategia y su ejecución. En consecuencia, busca eliminar la brecha entre el saber y el hacer. Concibe a la empresa como un esfuerzo colectivo que se desarrolla desde su interior, involucrando a los empleados en un proceso continuo de creación de valor (Ballé et al., 2017).

De acuerdo a Ballé et al. (2019) caracterizan a Lean como una estrategia basada en el aprendizaje que no separa el pensamiento estratégico de su ejecución ya que conlleva un conjunto de principios operativos para ejecutar la estrategia de la empresa. En el ámbito operativo, las prácticas Lean contribuyen a identificar y reducir las actividades que no agregan valor, promoviendo la mejora continua y facilitando la implementación de su dimensión estratégica. En este sentido, Lean se entiende como una transformación del trabajo orientada a optimizar las tareas operativas (Garcia Palao, 2025).

En las Pymes de manufactura, la filosofía Lean proporciona las herramientas concretas y disciplina para desarrollar capacidades dinámicas, haciendo efectivo el cambio y la innovación continua en los

procesos productivos (Borch & Madsen, 2007; Carreras, 2010). La integración de capacidades dinámicas y Lean fortalece la capacidad de las Pymes para innovar eficientemente en sus procesos, responder ágilmente a cambios de mercado y mejorar la productividad, lo que es esencial para su supervivencia y crecimiento en un entorno competitivo y en evolución (Weaven et al., 2021).

La implementación de enfoques Lean en Pymes manufactureras enfrenta barreras estructurales derivadas de sus propias características: limitación de recursos, escasa experiencia, ausencia de métodos y procedimientos estandarizados, estrategias de corto plazo y estructuras organizativas poco funcionales. La participación activa de la alta dirección es un factor determinante para el éxito en la implementación de Lean Manufacturing, especialmente en Pymes. Sin un compromiso claro por parte de la dirección en la aplicación de herramientas Lean, los esfuerzos operativos resultan insuficientes para lograr mejoras sostenibles en los sistemas productivos (Alefari et al., 2017).

Finalmente, las capacidades dinámicas incluyen una estrategia competitiva de la empresa que a su vez genera valor Rashidirad and Salimian (2020), lo cual genera coincidencia con los cinco principios del sistema Lean. De acuerdo a Zollo and Winter (2002) los cuales mencionan que para desarrollar capacidades dinámicas es necesario el aprendizaje organizacional en conjunto con la articulación y codificación del conocimiento, adicionando conceptos como acumulación de experiencia, la cual se refiere al proceso central de aprendizaje mediante el cual tradicionalmente se ha pensado que se desarrollan las rutinas operativas de las organizaciones (Sainz & Domínguez, 2024). Otros autores sugieren que las empresas que implementan pensamiento esbelto, desarrollan capacidades dinámicas que favorecen el desempeño operativo (Antony et al., 2012; Umar et al., 2014).

## 3. RESULTADOS

En la Figura 1 se esquematiza la relación que existe entre los cinco principios fundamentales del pensamiento esbelto que menciona Garcia Palao (2025), enriquecidos con un principio cero que proponen Anvari et al. (2011) y las características de las capacidades dinámicas (Eisenhardt & Martin, 2000; Teece, 2007; Zollo & Winter, 2002). Hay importantes aportaciones en las que destacan a las capacidades dinámicas como rutinas organizativas y estratégicas que utilizan las empresas para hacer nuevas configuraciones a medida que cambian los mercados (Eisenhardt & Martin, 2000). Más en concreto Teece and Pisano (2003); Teece (2000) nombran a Toyota Production System (TPS) en referencia al trabajo de Clark (1991) como una capacidad de dinámica singular de Toyota.

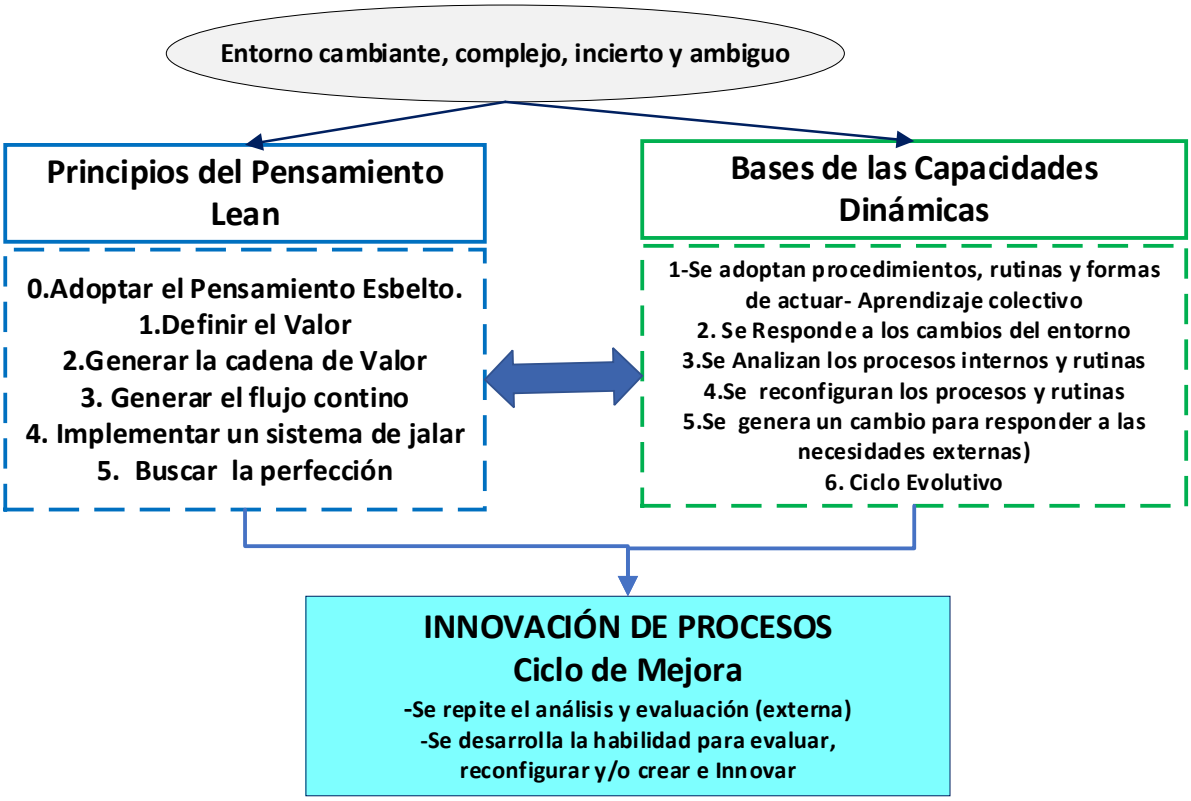



*Figura 1. Integración de los Principios del Enfoque Lean y las Capacidades Dinámicas.*
*Fuente: Elaboración propia adaptado de Cortés Rodríguez (2023); Rentería Salcedo (2016).*

Las Iniciativas de Lean Manufacturing y Lean Management, de acuerdo a Cortés Rodríguez (2023), provocan mejoras incrementales de forma cotidiana. Esta capacidad de generar progreso cotidiano coincide con el concepto de capacidades dinámicas del tipo incremental identificado por (Ambrosini & Bowman, 2009). En esta línea Anand et al. (2009) indica que Lean Manufacturing es una capacidad dinámica que impulsa el aprendizaje en las organizaciones que impulsa una mejora del desempeño de forma sistemática.

Sin embargo, en el relevamiento bibliográfico se identificaron pocos trabajos de investigación que aborden el impacto que pueden generar cualquiera de estas dos metodologías en el desarrollo y evolución de las capacidades dinámicas, y aún menos estudios que analicen su uso combinado. Si bien algunos autores han sugerido que la implementación de herramientas de Lean Manufacturing y Lean Management puede contribuir al desarrollo de capacidades dinámicas, no se han encontrado investigaciones empíricas que demuestren esta relación de manera concluyente. En esta línea, se destacan dos trabajos de tesis que exploran dicha conexión: Cortés Rodríguez (2023) y Rentería Salcedo (2016), cuyas principales ideas se presentan en la Figura 1.

A continuación se presenta la aplicación de procesos esbeltos (Lean) en una empresa metalmecánica analizada como caso de estudio en la provincia de Misiones, analizando el proceso de fabricación de campanas de extracción de aire, mediante el uso de análisis del Flujo de valor. En esta la primera fase se procede a analizar el proceso en forma detallada mediante el diagrama de bloque representado en la Figura 2 de manera de identificar los procesos críticos y productos no conformes y las actividades que no generen valor.

El análisis del flujo del valor permitió mostrar tres tipos de actividades: las que generan valor y son vitales para el proceso. 2) las que no generar valor. 3) las actividades que no agregan valor y pueden ser eliminadas (Cohen & Mantulak, 2024). Dentro del gráfico se representan el flujo de materiales, flujo de información e indicadores clave, a lo largo de los distintos procesos (actividades) de la cadena de valor (Carballo-Mendívil et al., 2018).




*Figura 2. Diagrama de bloque del proceso de Fabricación de Campanas de extracción de aire. Fuente: Elaboración propia.*

A continuación se presenta la propuesta de Cadavid (2013), en la Figura 3, como un proceso de mejoramiento definido en cuatro fases, es necesario incluir formalmente la necesidad del Kaizen como actividad principal y permanente de cualquier implementación de Lean Manufacturing. Esta se ubica en la parte superior, representando la cultura de mejoramiento continuo, la cual es gradual, ya que la forma de pensar y actuar de las personas no cambia instantáneamente, de un día para otro. Las fases que lo componen son las siguientes: se inicia en su primera fase, con el mapa de flujo del proceso (VSM), continuando con la organización de la casa (5S), diseño de los mejores procesos internos y por último la conexión con la demanda (pull- push, donde el cliente jala).

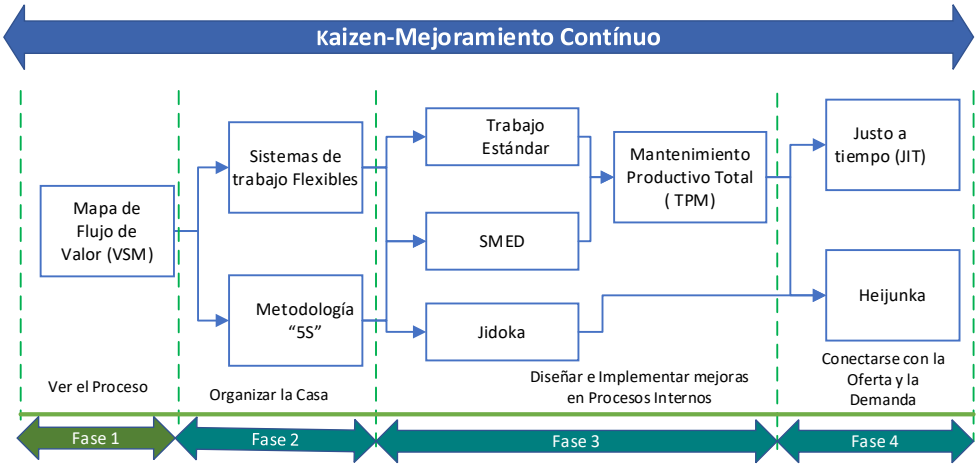



*Figura 3. Modelo de implementación de Lean Manufaturing. Fuente: Adaptado de Cadavid (2013).*

En la segunda fase, se organizó la planta por celdas de trabajo tipo “U” con grupos de trabajo flexibles, posteriormente se aplicó la metodología 5S. En la tercera fase se está en un avanzando en la estandarización de los procesos, documentación de los procesos y los instructivos y procedimientos de trabajo, en las celdas de trabajo en la parte de armado de la campana extractora.
A partir de la implementación parcial de Lean, se comenzará con aplicación de generar las capacidades dinámicas dentro de la Pyme metalmecánica analizada. De acuerdo a Cohen and Mantulak (2024) la implementación de Lean Manufacturing en Pymes metalmecánica, permite mejorar la productividad y fomentar la innovación de procesos mediante herramientas como el Mapa de la Cadena de Valor (VSM), la metodología 5S y la mejora continua. Estas prácticas no solo optimizan recursos, sino que también generan condiciones para la transformación organizacional mediante el desarrollo de las capacidades dinámicas.
La filosofía Lean, al centrarse en la eliminación de desperdicios, la mejora continua (Kaizen) y la estandarización de procesos, ofrece una base fértil para el desarrollo de capacidades dinámicas en Pymes manufactureras. Según Cortés Rodríguez (2023), la implementación de Lean Management permite alinear los objetivos estratégicos con las operaciones diarias, facilitando la adaptación organizacional frente a entornos cambiantes. Esta alineación estratégica y operativa constituye un mecanismo clave para la generación de capacidades dinámicas, especialmente en contextos de recursos limitados.
Por su parte, Rentería Salcedo (2016) argumenta que la adopción de prácticas de Lean Manufacturing como el trabajo estandarizado, el control visual y la gestión de calidad total, no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también promueve la reconfiguración de procesos internos, la integración de conocimientos tácitos y la renovación de rutinas organizacionales. Estos elementos son fundamentales en la construcción de capacidades dinámicas, entendidas como la habilidad de la empresa para integrar, construir y reconfigurar competencias internas y externas en respuesta a cambios del entorno (Teece, 2007).
En este sentido, la filosofía Lean actúa como catalizador de tres fundamentos de las capacidades dinámicas:

- **Sensibilidad al entorno**: mediante la mejora continua y la observación sistemática de procesos.
- **Capacidad de aprendizaje organizacional**: a través de la estandarización y la retroalimentación constante.
- **Reconfiguración de recursos**: mediante la flexibilidad operativa y la eliminación de actividades que no agregan valor.

La implantación efectiva de estas capacidades requiere, además, una transformación cultural que fomente la delegación, el liderazgo distribuido y la participación activa de los colaboradores en la toma de decisiones, superando la centralización típica en muchas pymes.
Rentería Salcedo (2016) sugiere que la filosofía Lean puede ser un catalizador para el desarrollo de capacidades dinámicas, especialmente en contextos de recursos limitados como los de las Pymes metalmecánicas. En la Tabla 1 podemos resumir las tres capacidades dinámicas claves que se relacionan con la filosofía Lean (Garzón Castrillón, 2018; Rotundo, 2020):

*Tabla 1. Relación entre los tipos de capacidades dinámicas y el enfoque Lean.*
*Fuente: Elaboración propia.*

| Capacidad Dinámica | Descripción | Relación con Lean |
|---|---|---|
| **Absorción** | Capacidad de identificar, asimilar y aplicar conocimiento externo | Se potencia con la apertura a benchmarking y retroalimentación de clientes |
| **Adaptación** | Habilidad para ajustar procesos y estructuras ante cambios | Se activa mediante la flexibilidad operativa y la mejora continua |
| **Aprendizaje** | Capacidad de generar nuevo conocimiento organizacional | Se desarrolla con la estandarización, reflexión y documentación de prácticas |

En base a Rentería Salcedo (2016), la capacidad de adaptación debería ser el punto de partida. Esto se debe a que las Pymes metalmecánicas en Misiones enfrentan entornos cambiantes, con cambios en la demanda, falta de capacitación, cambios de tecnología y procesos informales. La filosofía Lean, al fomentar la flexibilidad y la mejora continua, permite que estas empresas ajusten sus procesos sin requerir grandes inversiones.
Una vez que la adaptación esté en marcha, se puede avanzar hacia la absorción (por ejemplo,

integrando conocimientos de proveedores o clientes) y luego consolidar el aprendizaje organizacional mediante rutinas reflexivas y documentación sistemática.
Para comenzar a implementar la capacidad dinámica de adaptación en el caso de la Pyme metalmecánica que estamos estudiando, consiste en reconfigurar procesos internos para responder ágilmente a los cambios del entorno. Esta capacidad implica ajustar estructuras, rutinas y recursos de manera flexible, sin perder eficiencia operativa que se está realizando por medio del enfoque Lean, que permitió estandarizar los procesos y rutinas. Además se establecieron reuniones breves semanales con operarios para identificar problemas y proponer mejoras, con el agregado de talleres de capacitación a los operarios en múltiples funciones.
El siguiente paso que la empresa analizada debe avanzar, es hacia la capacidad dinámica de absorción**,** que consiste en fortalecer la habilidad de la organización para identificar, asimilar, transformar y explotar conocimiento externo. Según García Hernández et al. (2020), la capacidad de absorción se despliega en cuatro fases: adquisición, asimilación, transformación y explotación. En el contexto de las Pymes metalmecánicas, estas fases no requieren grandes inversiones, sino inteligencia organizacional, apertura al entorno y voluntad de aprendizaje. Esta capacidad permite que las empresas aprendan del entorno y conviertan ese aprendizaje en innovación incremental, incluso en contextos de recursos limitados.
Este proceso no ocurre de manera espontánea, sino que se construye paso a paso, a través de cuatro momentos clave. Primero, la empresa debe adquirir conocimiento al abrirse al entorno: ferias, capacitaciones, conversaciones con clientes o proveedores. Este contacto inicial permite identificar ideas valiosas que podrían mejorar sus procesos. Luego, ese conocimiento se asimila internamente.
En la tercera etapa, la organización transforma lo aprendido en acciones concretas, se ajustan rutinas, rediseña productos o modifica prácticas, generando mejoras tangibles sin necesidad de grandes inversiones. Finalmente, ese conocimiento se explota, o sea se convierte en valor para el cliente, en eficiencia para la empresa y en una ventaja competitiva que posiciona a la pyme en su entorno. Este recorrido demuestra que la innovación no siempre requiere tecnología de punta, sino una actitud abierta al aprendizaje y una cultura organizacional capaz de convertir ideas externas en mejoras internas. En definitiva, absorber conocimiento es aprender a crecer con inteligencia.
Una Pyme que ha adaptado sus procesos y absorbido conocimiento externo, como vimos en etapas anteriores, puede ahora generar nuevo conocimiento propio. Este aprendizaje no es solo técnico, también es estratégico. La empresa aprende a leer el mercado, a anticipar cambios, a formar líderes internos. Como señala Otero et al. (2023), el aprendizaje organizacional como capacidad dinámica permite articular recursos, coordinar acciones y sostener ventajas competitivas en entornos cambiantes.
En definitiva, el aprendizaje cierra el ciclo de las capacidades dinámicas: primero se adapta, luego se absorbe, y finalmente se aprende. Para las pymes metalmecánicas, este proceso no es lineal ni perfecto, pero sí profundamente transformador. Aprender es, en última instancia, la forma más poderosa de crecer y ser competitivo.

## 4. CONCLUSIONES

La presente investigación propuso una metodología integradora entre la filosofía Lean Management y el enfoque de capacidades dinámicas, aplicada a una pyme metalmecánica de la provincia de Misiones. A través del método de estudio de caso, se logró analizar en profundidad los procesos productivos, identificar actividades que no agregaban valor y aplicar herramientas Lean y la estandarización de procesos y rutinas. Esta implementación permitió iniciar el desarrollo de la capacidad dinámica de adaptación, evidenciando mejoras en la organización del trabajo, la eficiencia operativa y la participación activa del personal en la mejora continua.
Los resultados obtenidos muestran que la filosofía Lean no solo optimiza recursos, sino que también genera condiciones propicias para la innovación de los procesos y la transformación organizacional. En particular en el estudio de caso, se observó que la estandarización y la mejora continua facilitaron la reconfiguración de procesos internos, lo que constituye el primer paso hacia la construcción de capacidades dinámicas más complejas como la absorción y el aprendizaje organizacional. La empresa analizada está avanzando en la identificación y asimilación de conocimiento externo, y en un próximo paso empezar a generar conocimiento propio a partir de la experiencia. En síntesis de acuerdo a lo comentado, la empresa recién inicia su camino en la capacidad de adaptación, dejando como mensaje que adaptarse es el comienzo, pero aprender es el destino. La evolución organizacional no ocurre de un día para otro, pero cada paso, por pequeño que sea, acerca a la empresa a una posición más sólida, innovadora y competitiva.
Como recomendación para trabajos futuros, se sugiere ampliar la muestra a otras Pymes

manufactureras de la región para validar empíricamente la relación entre Lean Management y capacidades dinámicas. El caso analizado demuestra que, incluso en contextos de recursos limitados, es posible iniciar procesos de transformación profunda, lo que convierte esta experiencia en una base sólida para estudios comparativos y propuestas orientadas al fortalecimiento de las Pymes de manufactura en zonas periféricas y otras regiones de Argentina.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


Alefari, M., Salonitis, K., & Xu, Y. (2017). The role of leadership in implementing lean manufacturing. *Procedia Cirp*, *63*, 756-761.

Ambrosini, V., & Bowman, C. (2009). What are dynamic capabilities and are they a useful construct in strategic management? *International journal of management reviews*, *11*(1), 29-49.

Anand, G., Ward, P. T., Tatikonda, M. V., & Schilling, D. A. (2009). Dynamic capabilities through continuous improvement infrastructure. *Journal of operations management*, *27*(6), 444-461.

Antony, J., Manville, G., Greatbanks, R., Krishnasamy, R., & Parker, D. W. (2012). Critical success factors for Lean Six Sigma programmes: a view from middle management. *International journal of quality & reliability management*, *29*(1), 7-20.

Anvari, A., Zulkifli, N., Yusuff, R. M., Hojjati, S. M. H., & Ismail, Y. (2011). A proposed dynamic model for a lean roadmap. *African Journal of Business Management*, *5*(16), 6727.

Arcentales, J. M., Ramos, I. B., Soriano, F. R., & Allaica, J. C. M. (2022). Manufactura esbelta para eliminación de desperdicios en PyMEs: Una revisión sistemática de la literatura. *593 Digital Publisher CEIT*, *7*(4), 483-495.

Ballé, M., Chaize, J., & Jones, D. (2019). Lean as a learning system: What do organizations need to do to get the transformational benefits from Toyota's method? *Development and Learning in Organizations: An International Journal*, *33*(3), 1-4.

Ballé, M., Jones, D. T., Chaize, J., & Fiume, O. (2017). The Lean Strategy: using lean to create competitive advantage, unleash innovation, and deliver sustainable growth. *(No Title)*.

Batista Mota, F., Damasceno Pinto, C., Paranhos, J., & Hasenclever, L. (2017). Mapping the 'dynamic capabilities' scientific landscape, 1990-2015: A bibliometric analysis. *COLLNET Journal of Scientometrics and Information Management*, *11*(2), 309-324.

Borch, O. J., & Madsen, E. L. (2007). Dynamic capabilities facilitating innovative strategies in SMEs. *International Journal of Technoentrepreneurship*, *1*(1), 109-125.

Canta Honores, J. L., & Quesada Llanto, J. (2021). El uso del enfoque del estudio de caso: Una revisión de la literatura. *Horizontes Revista de Investigación en Ciencias de la Educación*, *5*(19), 775-786.

Carazo, P. C. M. (2006). El método de estudio de caso: estrategia metodológica de la investigación científica. *Pensamiento & gestión*(20), 165-193.

Carballo-Mendívil, B., Arellano-González, A., & Ríos-Vázquez, N. J. (2018). La Gestión De Procesos Como Principio De Mejora Un Caso Aplicado a Una Comercializadora. *3C Empresa*, *7*(3), 60.

Carreras, M. R. (2010). *Lean Manufacturing. La evidencia de una necesidad*. Ediciones Díaz de Santos.

Clark, K. B. (1991). Product development performance: Strategy, organization, and management in the world auto industry. *(No Title)*.

Cohen, R. S., & Mantulak, M. J. (2024). "Contribución Lean Manufacturing en la mejora e innovación de procesos en las Pymes manufactureras". *JIDeTEV*(14).

Cortés Rodríguez, J. R. (2023). *Lean Management y Hoshin Kanri: Impactos en el desempeño estratégico y operativo* Universidad de Granada].

Cuatrecasas, L. (2016). *Claves del lean management en tiempos de maxima competitividad*.

Cuatrecasas, L. (2016). *Claves del lean management en tiempos de maxima competitividad: Cómo gestionar en la práctica una empresa altamente competitiva*. Profit Editorial.

Danneels, E. (2002). The dynamics of product innovation and firm competences. *Strategic management journal*, *23*(12), 1095-1121.

Díaz, A. B., Melgarejo, M. A., Rodríguez, I. C. R., & Medina, J. E. C. (2023). Capacidades dinámicas como determinantes de la capacidad de innovación en Colombia. *Revista de Ciencias Sociales*, *29*(2), 255-276.

Eisenhardt, K. M., & Martin, J. A. (2000). Dynamic capabilities: what are they? *Strategic management journal*, *21*(10-11), 1105-1121.

García Hernández, Y., Mendoza Moheno, J., & Pérez Hernández, C. C. (2020). Medición de las capacidades de absorción en la industria manufacturera. *Investigación administrativa*, *49*(126).

Garcia Palao, C. (2025). Factores de éxito en los equipos de trabajo de los sistemas Lean Management.

Garzón Castrillón, M. A. (2015). Modelo de capacidades dinámicas. *Dimensión empresarial*, *13*(1), 111-131.

Garzón Castrillón, M. A. (2018). Capacidad dinámica de adaptación.

Grant, R. M. (1991). The resource-based theory of competitive advantage: implications for strategy formulation. *California management review*, *33*(3), 114-135.

Helfat, C. E. (1997). Know-how and asset complementarity and dynamic capability accumulation: the case of R&D. *Strategic management journal*, *18*(5), 339-360.

Helfat, C. E., & Peteraf, M. A. (2003). The dynamic resource-based view: Capability lifecycles. *Strategic management journal*, *24*(10), 997-1010.

Krajewski, L. J., & Malhotra, M. K. (2022). *Operations management: Processes and supply chains*. Pearson.

Krajewski, L. J., Ritzman, Larry P.& Malhotra, Manoj K. . (2013). *Administración de operaciones. Procesos y cadena de suministro.*

Locher, D. (2017). *Lean office: Metodología Lean en servicios generales, comerciales y administrativos*. Profit Editorial.

López-Torres, G. C., Maldonado Guzmán, G., Pinzón Castro, S. Y., & García Ramírez, R. (2016). Colaboración y actividades de innovación en Pymes. *Contaduría y administración*, *61*(3), 568-581.

Matías, J. C. H., & Idoipe, A. V. (2013). *Lean manufacturing: concepto, técnicas e implantación*. Fundación EOI.

Narayan, J., Gudergan, S., Pathak, R. D., & Singh, G. (2023). Dynamic Capabilities in Public Enterprises. In *Global Encyclopedia of Public Administration, Public Policy, and Governance* (pp. 3460-3474). Springer.

Navarrete Guasgua, K. G. (2025). *Influencia de las Practicas Lean manufacturing en la Innovación de procesos de manufactura en las grandes empresas de empaques plásticos del Distrito Metropolitano de Quito* Quito: EPN, 2025.].

Otero, M. S., Puello, I. B., & Gil-Osorio, I. (2023). Aprendizaje en las empresas como capacidad dinámica. *Dictamen Libre*(32: Enero-Junio), 15-24.

Palacio-Fierro, A., Arévalo-Chávez, P., & Guadalupe-Lanas, J. (2017). Tipología de la Innovación Empresarial según Manual de Oslo. *CienciAmérica*, *6*(1), 97-102.

Penrose, E. T. (1959). *The Theory of the Growth of the Firm*. Oxford university press.

Pinzón, D. S. M., Sarmiento, W. J. A., & Sandoval, D. C. V. (2018). Uso y aplicación de herramientas del modelo de producción Toyota: una revisión de literatura. *Revista Politécnica*, *14*(27), 80-92.

Quintero Sepúlveda, I. C., Ospina Nieto, Y., Quiroga Parra, D. J., & Cubillos-González, R.-A. (2021). Relación entre capacidad de innovación e índice de innovación en América Latina. *Journal of technology management & innovation*, *16*(3), 47-56. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27242021000300047

Rashidirad, M., & Salimian, H. (2020). SMEs' dynamic capabilities and value creation: the mediating role of competitive strategy. *European Business Review*, *32*(4), 591-613.

Rentería Salcedo, J. A. (2016). *Implementación del pensamiento esbelto: Impacto en instituciones de salud y en la generación de capacidades dinámicas*.

Ribas, F., Lazcano, M. B. L., & Abrego, D. S. (2024). Transformación digital en empresas argentinas: una revisión de alcance. *Costos y Gestión*(107).

Rojo, J., Remes Lenicov, M., Wydler, A., Di Franco, A., Vismara, F., Sebastián, J. L., . . . Yovovich, J. P. (2020). El desafío de la competitividad para las pymes argentinas: miradas desde la gestión, la competitividad y las políticas públicas.

Rotundo, G. Z. (2020). Capacidades dinámicas e innovación en las organizaciones. Una revisión de la literatura y proposiciones básicas. *Compendium: revista de investigación científica*(45), 3.

Rueda, E. (2007). Aplicación de la metodología seis sigmas y lean manufacturing para la reducción de costos, en la producción de jeringas hipodérmicas desechables. *Instituto Politécnico Nacional. México*.

Sainz, A. K. R. S. R., & Domínguez, D. B. (2024). Las Capacidades Dinámicas: Una Revisión de su Evolución y el Papel que juegan en el Crecimiento de las Organizaciones. *Estudios y Perspectivas Revista Científica y Académica*, *4*(3), 181-197.

Sánchez, M. P. R., Paparella, L. E. S., & Rotundo, G. J. Z. (2022). Teoría de Capacidades Dinámicas: Aportes y Evolución a partir de los trabajos de David Teece. *Compendium*, *25*(48. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.7127188).

Sarria Yépez, M. P., Fonseca Villamarín, G. A., & Bocanegra-Herrera, C. C. (2017). Modelo metodológico de implementación de lean manufacturing. *Revista EAN*(83), 51-71.

Teece, D., & Pisano, G. (2003). *The dynamic capabilities of firms*. Springer.

Teece, D. J. (2000). *Managing intellectual capital: Organizational, strategic, and policy dimensions*. OUP Oxford.

Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic management journal*, *28*(13), 1319-1350.

Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic management journal*, *18*(7), 509-533.

Trillo-Holgado, M. A., León-Urban, C., & López-Caballero, R. (2022). La importancia de las capacidades dinámicas en el replanteamiento de una ventaja competitiva innovadora. Estudio de caso en empresas tecnológicas cordobesas. *Revista de Estudios Andaluces*(43), 125-143.

Umar, M., Bakar, A., Hamid, A., & Mehri, M. (2014). Manufacturing Practices: Impact on Manufacturing Capabilities and Performance. *Management and Administrative Sciences Review*, *439*, 425-439.

Valencia Jarama, J. L., Gutierrez Canchasto, G. A., & Flores Marchán, V. M. (2025). Lean Manufacturing en el mejoramiento continuo de la productividad. *Revista InveCom*, *5*(2).

Vargas-Hernández, J. G., Muratalla-Bautista, G., & Jiménez-Castillo, M. (2016). Lean M anufacturing¿ una herramienta de mejora de un sistema de producción? *Ingeniería Industrial. Actualidad y nuevas tendencias*(17), 153-174.

Wang, C. L., & Ahmed, P. K. (2007). Dynamic capabilities: A review and research agenda. *International journal of management reviews*, *9*(1), 31-51.

Weaven, S., Quach, S., Thaichon, P., Frazer, L., Billot, K., & Grace, D. (2021). Surviving an economic downturn: Dynamic capabilities of SMEs. *Journal of Business Research*, *128*, 109-123. https://doi.org/110.1016/j.jbusres.2021.1002.1009.

Zollo, M., & Winter, S. G. (2002). Deliberate learning and the evolution of dynamic capabilities. *Organization science*, *13*(3), 339-351.

# TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN NUTRICIÓN Y SANIDAD AVIAR: UN ESTUDIO DE PROVEEDORES ESPECIALIZADOS EN ARGENTINA.

Blanc, Rafael[1]; Rodríguez, María Alejandra[1]; Minetti, Esteban[2]

*[1] UTN Facultad Regional Concepción del Uruguay*
*[2] INTA Estación Experimental Agropecuaria Concepción del Uruguay*
*(rlblanc@frcu.utn.edu.ar, rafaelujanblanc@yahoo.com.ar; rodrigueza@frcu.utn.edu.ar; minetti.esteban@inta.gob.ar)*

**RESUMEN**

El objetivo de este estudio es analizar el uso de tecnologías avanzadas por parte de empresas proveedoras especializadas en nutrición y sanidad aviar dentro del sector avícola, con especial atención en herramientas como genómica, proteómica, cultivo e ingeniería de células, transgénesis y vectores génicos, bioinformática, nanobio tecnología e inteligencia artificial. Asimismo, se examinan los resultados en materia de innovación alcanzados por estas firmas que les permiten competir, adaptarse y sostenerse en contextos de creciente desarrollo tecnológico.
Este trabajo es parte de un estudio en desarrollo realizado por el Observatorio sobre Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación del Sector Avícola de Entre Ríos (INTA-UTN). Para ello, se relevaron 17 empresas de capitales nacionales y extranjeros con presencia en Argentina, mediante encuestas semiestructuradas realizadas durante el año 2024 a firmas referentes en el rubro. Se concluye que las empresas analizadas emplean distintos tipos de tecnologías, siendo la genómica y la proteómica las más comúnmente utilizadas. En cuanto al uso de inteligencia artificial, aproximadamente el 23% de las firmas declaró utilizarla, principalmente como soporte para actividades administrativas y de gestión. Respecto a innovación, la modalidad más frecuente fue la innovación de producto (76%), seguida por innovaciones vinculadas a servicios (56%), mientras que cerca del 30% informó haber implementado innovaciones en procesos productivos.

**Palabras Claves:** Innovación, Tecnologías, Sanidad y Nutrición animal.

**ABSTRACT**

The objective of this study is to analyze the use of advanced technologies by specialized supplier firms in poultry nutrition and health within the poultry sector, with particular emphasis on tools such as genomics, proteomics, cell culture and engineering, transgenesis and gene vectors, bioinformatics, nanobiotechnology, and artificial intelligence. Furthermore, it examines the innovation outcomes achieved by these firms that enable them to compete, adapt, and remain sustainable in contexts of increasing technological development.
This work is part of an ongoing study conducted by the Observatory on Scientific, Technological, and Innovation Development of the Poultry Sector of Entre Ríos (INTA–UTN). To this end, 17 companies with national and foreign capital operating in Argentina were surveyed through semi-structured questionnaires administered in 2024 to leading firms in the sector. The results indicate that the analyzed companies employ various types of technologies, with genomics and proteomics being the most commonly used. Regarding artificial intelligence, approximately 23% of firms reported its use, mainly as support for administrative and management activities. In terms of innovation, the most frequent modality was product innovation (76%), followed by service-related innovations (56%), while around 30% reported having implemented innovations in production processes.

**Keywords:** Innovation, Technologies, Animal Health and Nutrition.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sector avícola constituye un actor relevante en la producción agroindustrial en Argentina, tanto por su aporte a la seguridad alimentaria como por su creciente importancia en los mercados internacionales. La demanda global de proteínas de origen animal impulsa a las empresas proveedoras de nutrición y sanidad aviar a adoptar tecnologías avanzadas y estrategias de innovación que garanticen competitividad, inocuidad y sostenibilidad en un entorno dinámico. En este escenario, las empresas intensivas en conocimiento, conocidas como Knowledge Intensive Business Services (KIBS), juegan un rol estratégico al facilitar la transferencia tecnológica y de saberes que las compañías productoras no siempre poseen de manera interna. Su intervención permite acelerar procesos de aprendizaje organizacional, generar valor agregado y consolidar vínculos con cadenas globales de valor.

El avance científico y tecnológico aplicado a la genética, la nutrición y la sanidad aviar ha transformado profundamente la dinámica del sector. La incorporación de herramientas como la genómica, la proteómica y el cultivo celular ha permitido identificar marcadores de resistencia a enfermedades, optimizar el uso de nutrientes y reducir la dependencia de antibióticos. A su vez, la integración con programas de nutrición de precisión contribuye a mejorar la bioseguridad y a fortalecer la sostenibilidad productiva. En este sentido, la innovación no solo impacta en la productividad, sino también en la capacidad de prevenir riesgos epidemiológicos y en la conformidad con estándares internacionales de calidad.

Las tecnologías específicas, como la biotecnología, la transgénesis y el desarrollo de vectores génicos, se complementan con tecnologías transversales, entre las que destacan la inteligencia artificial, la bioinformática y la nanotecnología y el uso de sensores de Internet de las Cosas (IoT). Mientras las primeras generan soluciones concretas para la sanidad y nutrición, las segundas habilitan nuevas formas de análisis, trazabilidad y modelado predictivo. La combinación de ambas categorías potencia la capacidad innovadora del sector.

El presente trabajo se centra en el estudio de empresas proveedoras especializadas en nutrición y sanidad aviar en Argentina, analizando el grado de adopción tecnológica y los patrones de comportamiento innovador. Se busca comprender no solo qué tecnologías están siendo utilizadas, sino también cómo estas se relacionan con la generación de nuevos productos, servicios y procesos.

Se intenta responder a preguntas como: ¿Qué modalidades de innovación desarrollan las empresas del sector de nutrición y sanidad aviar en Argentina, y cuáles son sus características distintivas?

¿Cómo se relaciona la adopción de tecnologías avanzadas con el comportamiento hacia la innovación en este sector?

Desde una perspectiva metodológica, el estudio adopta un enfoque exploratorio basado en encuestas estructuradas a responsables de innovación y gestión tecnológica en empresas del sector. La información recopilada permite caracterizar tanto las actividades de investigación y desarrollo como las relaciones con instituciones científicas y académicas, ofreciendo una visión integral de la forma en que estas organizaciones enfrentan los desafíos de modernización tecnológica y sostenibilidad productiva.

El documento se organiza en cuatro secciones principales. En primer lugar, se presenta el marco de referencia, donde se discuten los conceptos centrales vinculados a los KIBS, la genética aviar y la relevancia de las tecnologías específicas y transversales. En segundo lugar, se expone la metodología empleada para la recolección y análisis de datos, detallando los criterios de selección de la muestra y las variables analizadas. Posteriormente, se desarrollan los resultados, que describen las innovaciones implementadas, las tecnologías adoptadas y los perfiles de las empresas identificados mediante análisis de clúster. Finalmente, se incluyen las conclusiones, que sintetizan los hallazgos, reconocen las limitaciones del estudio y proponen líneas futuras de investigación orientadas a profundizar en la relación entre adopción tecnológica, innovación y competitividad en la industria aviar.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

Las empresas intensivas en conocimiento KIBS constituyen un pilar estratégico para la innovación en sectores tradicionales como el avícola. Su rol radica en proveer soluciones basadas en investigación, asesoría tecnológica y transferencia de conocimiento, lo cual favorece la adopción de prácticas avanzadas que favorecen la crianza y comercialización de productos aviares (Lepratte, Blanc y Hegglin, 2020).

En el contexto argentino, los KIBS que tienen un elevado impacto en la producción avícola son las que provienen del rubro sanidad y nutrición. Las mismas integran capacidades científicas y

tecnológicas que las firmas que crían y procesan aves no tienen la capacidad de desarrollar internamente. Esta interacción impulsa procesos de aprendizaje organizacional, eleva la competitividad y facilita la inserción en mercados internacionales al garantizar estándares de calidad y trazabilidad (Müller & Zenker, 2001; Lepratte et al, 2015; Wang & Wang, 2022).
La genética aplicada a la avicultura ha evolucionado desde la selección de rasgos productivos básicos hacia el uso de herramientas de biología molecular como la genómica y la proteómica. Estas permiten identificar marcadores asociados a resistencia a enfermedades, eficiencia en el uso de nutrientes y mayor productividad. Su integración con programas de nutrición de precisión reduce la dependencia de antibióticos, optimiza la formulación de dietas y fortalece la bioseguridad. De esta manera, la genética no solo impacta en el rendimiento productivo, sino también en la sostenibilidad sanitaria y en la reducción de riesgos epidemiológicos (Muir & Aggrey, 2014; Mottet & Tempio, 2017, Kim et all, 2022; Castro et al, 2023).
El sector avícola enfrenta crecientes desafíos vinculados con la demanda global de proteínas y la necesidad de garantizar inocuidad. Para responder, las empresas proveedoras recurren tanto a tecnologías específicas como biotecnología, transgénesis, vectores génicos o cultivo celular como a tecnologías transversales, tales como inteligencia artificial, bioinformática, sensores de IoT y nanotecnología (Castro et al, 2023).
Las tecnologías específicas ofrecen soluciones dirigidas al desarrollo de vacunas, aditivos funcionales y diagnósticos tempranos de patologías. Las transversales, en cambio, actúan como habilitadoras al permitir la integración de datos, el modelado predictivo y la trazabilidad en tiempo real. En conjunto, ambas generan sinergias que potencian la capacidad innovadora del sector y su resiliencia frente a cambios en el entorno productivo y sanitario (Frank et al., 2019; Lepratte, Blanc y Hegglin, 2020; Castro et al, 2023).

## 3. METODOLOGÍA

Para el estudio se seleccionaron firmas del sector nutrición y salud dedicadas al sector de producción de aves de cría en la Argentina. El criterio de selección de los casos fue que debían producir, comercializar y/o prestar servicios relacionados con la producción de carne aviar.
Se conformó un universo de 40 firmas sobre la base de información secundaria de Cámaras Empresariales relacionadas con el sector en la Argentina, de las cuales se logró la respuesta por parte de 17 hasta el momento de este análisis (tasa de respuesta del 42,5 %). No se aceptaron en la muestra firmas que solamente comercialicen productos de otras firmas manufactureras, sean de nutrición o de salud animal. Se aplicó un formulario de encuesta estructurado con preguntas cerradas y abiertas, orientadas a cuestiones descriptivas generales de las firmas (productos, servicios, comercialización, exportaciones, tamaño, antigüedad), actividades de I+D, laboratorio y granjas experimentales, tipos de innovaciones efectuadas y cooperación tecnológica.
Las personas que respondieron las encuestas fueron gerentes o responsables de I+D y personal relacionado con la de gestión tecnológica e innovación. El relevamiento completo se efectuó entre 2024-2025 en forma presencial y mediada por tecnología.
Se utilizaron como variables para el armado de las dimensiones las de la clasificación del Manual de Oslo (edición 2018), con un desglose de las innovaciones de productos, considerando aquellas referidas a bienes como innovaciones de productos propiamente dichas, y, por otro lado, las de servicios. De la misma forma se especifican las mejoras no significativas en productos (bienes) y servicios para captar la especificidad de estos resultados en las firmas analizadas.
Del total de las firmas proveedoras especializadas que consideramos en este estudio, el 41 % de la muestra son firmas de nutrición, 49 % son de salud animal. La muestra se compone por 65 % de empresas de capital argentino y 35 % de empresas con inversión extranjera directa (en adelante, IED).
Conforme al análisis del tipo de productos y servicios ofrecidos, las empresas de capitales argentinos se concentran en el rubro salud animal, con el 54,5 % de los casos. Las empresas extranjeras se concentran mayormente en actividades de salud animal (66,7 %).
La exportación de productos y servicios se da en el 64,7 % de las firmas de la muestra. El tamaño promedio de las firmas en cantidad de empleados es de 126 con una desviación estándar de 171 lo que describe una eleva heterogeneidad en la muestra en cuanto a tamaño. Las firmas de sanidad son de mayor tamaño con una media de 144 empleados frente a 100 de las de las de nutrición.
Se relevaron nueve tecnologías y técnicas utilizadas por las empresas para la mejora de productos, servicios y procesos las mismas se detallan en la Tabla 1.

*Tabla 1 Descripción de las tecnologías analizadas en la muestra.*

| Técnicas | Descripción de posibles actividades |
|---|---|
| a) ADN/ARN | Genómica, fármaco genómico, transcriptómica, sondas; ingeniería genética; secuenciación / síntesis / amplificación de ADN / ARN; tecnología antisentido. |
| b) Proteínas y otras moléculas | Proteómica; secuenciación / síntesis / ingeniería de proteínas y péptidos; “drug delivery”; aislamiento y purificación de proteínas; “signaling” molecular o celular. |
| c) Cultivo e ingeniería de células y tejidos | Cultivo de células / tejidos; ingeniería de tejidos (incluye estructuras soporte para tejidos, “tissue scaffolds”, e ingeniería biomédica); fusión celular; vacunas e Inmuno estimulantes; manipulación de embriones; micropropagación vegetal |
| d) Transgénesis y vectores génicos | Vectores ARN, terapia génica, vectores virales, clonación |
| e) Procesos biotecnológicos | Fermentación usando bioreactores; bioprocesamiento de materiales; bio decoloración; bio pulpado; biolixiviación; bio desulfuración; biorremediación; remediación vegetal; biofiltración. |
| f) Bioinformática | Bases de datos de genomas y de secuencia de proteínas y otras moléculas; modelamiento de procesos biológicos complejos, incluyendo biología de sistemas |
| g) Nanobio tecnología | Herramientas, nuevos materiales y procesos de nano/micro fabricación para: construir dispositivos, estudiar biosistemas, “drug delivery”, diagnóstico, etc. |
| h) Medición /reducción Impacto ambiental. | Análisis de ciclo de vida de producto, como huellas ambientales, mediciones in situ de parámetros ambientales. |
| I) Inteligencia Artificial | Análisis de imágenes, monitoreo de individuos, monitoreo de salud y pronóstico, análisis de nutrientes, análisis de comportamiento, modelos de clasificación, formulación de nutrientes. |

Para poder realizar una división del grupo de empresas en lo relativo a adopción de tecnologías y comportamiento hacia la innovación se realizaron dos proxys de basados en las variables principales del estudio.
Proxy 1, determinado por el promedio de las variables de comportamiento hacia la innovación. Dominio entre 0 y 1.
Proxy 2, determinado por el promedio de las variables de Adopción de tecnologías. Dominio entre 0 y 1.
Para evaluar si había relaciones entre ambos proxys para que sean convenientes para utilizar como variables de división de la muestra se realizó el análisis de correlación de Pearson (Tabla 2) dado que son variables escalares de tipo lineal. El resultado es que ambas están correlacionadas a nivel medio y en sentido positivo, lo que afirma que las empresas con mayor adopción de tecnologías son las de mejor comportamiento hacia la innovación.

*Tabla 2 Correlaciones entre proxis.*

| | | Comportamiento hacia la innovación (proxy 1) |
|---|---|---|
| Adopción de tecnologías (proxy 2) | Correlación de Pearson | ,679** |
| | Sig. (bilateral) | ,003 |
| | N | 17 |

**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Para la determinación de los grupos, se uso un modelo de clúster bietápico con determinación automática de la cantidad de grupos basadas en las distancias interiores y entre grupos. El resultado fueron dos grupos con un ajuste elevado (Figura 1).

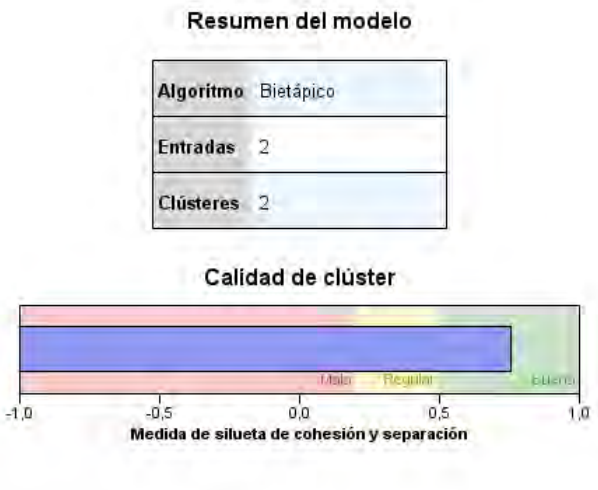



*Figura 1 Resultado del modelo de clúster bietápico.*

Se obtuvieron dos grupos el A con 6 empresas (35,3 %) y el B con 11 empresas (64,7 %). A continuación, en los resultados, se detallará el comportamiento de la muestra y de los grupos en cuestiones relacionadas a la innovación y al uso de tecnologías.

## 4. RESULTADOS

En cuanto a las innovaciones realizadas en el periodo de los dos últimos años por las firmas de la muestra (Tabla 3) se destaca las innovaciones productos, servicios y mejora de productos. Es destacable que más de un tercio de las firmas presento u obtuvo patentes de protección de sus productos y el 12 % adquirió patentes de terceros. Las innovaciones menos frecuentes fueron las relacionadas a mejora de procesos y modelos de comercialización que no alcanzaron el 6% de las firmas.

*Tabla 3 Resultados de comportamiento hacia la innovación en la muestra.*

| Comportamiento hacia la innovación | Porcentaje |
|---|---|
| a) Nuevos productos | 76,5 |
| b) Nuevos servicios | 52,9 |
| d) Productos con mejoras significativas | 35,3 |
| i) Obtuvo/Presentó Patentes | 35,3 |
| c) Nuevos procesos | 29,4 |
| e) Servicios con mejoras significativas | 29,4 |
| h) Cambios organizacionales | 29,4 |
| j) Adquirió Patentes | 11,8 |
| f) Procesos con mejoras significativas | 5,9 |
| g) Nuevos modelos de comercialización | 5,9 |

Las técnicas / tecnologías adoptadas por las firmas (Tabla 4) con mayor presencia son los procesos biotecnológicos, los cultivos e ingeniería de células y tejidos, las tecnologías relacionadas al ADN/ARN y las actividades relacionadas al trabajo con proteínas y otras moléculas. La tecnología menos utilizada es la transgénesis y los vectores génicos en donde solo el 6% de las firmas la aplican. Destaca el elevado compromiso de las firmas con cuestiones ambientales alrededor del 60% realiza actividades de medición y/o reducción de impacto ambiental. La presencia de inteligencia artificial es incipiente solo el 23,5% expresó estar comenzando a utilizarla y no en actividades avanzadas si no, sobre todo en cuestiones administrativas y rutinarias como escritura de informes, análisis de datos y marketing entre otros, aunque se destaca su potencial a futuro como herramienta de mejora.

*Tabla 4 Resultados de adopción de tecnologías en la muestra.*

| Técnicas / tecnologías | Porcentaje |
|---|---|
| e) Procesos biotecnológicos | 64,7 |
| h) Medición /reducción Impacto ambiental. | 58,8 |
| c) Cultivo e ingeniería de células y tejidos | 41,2 |
| a) ADN/ARN | 35,3 |
| b) Proteínas y otras moléculas | 35,3 |
| I) Inteligencia Artificial | 23,5 |
| f) Bioinformática | 17,6 |
| g) Nanobio tecnología | 17,6 |
| d) Transgénesis y vectores génicos | 5,9 |

Como se abordó en la metodología se dividió la muestra en dos grupos de diferente rendimiento en cuanto a innovación y adopción de tecnologías. El grupo A es el menos virtuoso o de menor adopción, mientras grupo B es el de elevada adopción. Se debe tener en cuenta que el dominio de los proxis es entre 0 y 1 (Ver tabla 5).

*Tabla 5 Resultados en los proxis de los dos grupos*

| Número de clúster bietápico | A | B |
|---|---|---|
| Proxy 1 Comportamiento hacia la innovación Media | 0,03 | 0,46 |
| Proxy 2 Adopción de tecnologías Media | 0,06 | 0,48 |

El grupo A tiene una media menor de empleados que el grupo B con 81 frente a 151. Están distribuidas en mitad en el negocio de la nutrición y la otra parte dedicada sanidad, no cuenta con empresas de capital extranjero y el 67% son exportadoras de productos y no exportan servicios. El grupo B son empresas de mayor tamaño, se concentran en el sector sanidad con el 63,6% de los casos, son aproximadamente la mitad de capital nacional, exportan productos a nivel de las A, pero existe además la exportación de servicios (ver Tabla 6).

*Tabla 6 Características generales de cada grupo.*

| | A | B |
|---|---|---|
| Empleados (Media) | 81 | 151 |
| Nutrición | 50,0% | 36,4% |
| Sanidad | 50,0% | 63,6% |
| Capital Extranjero | 0,0% | 54,5% |
| Capital Nacional | 100,0% | 45,5% |
| Exporto productos | 66,67% | 63,64% |
| Exporto servicios | 0,0% | 18,2% |

El grupo A solo realizó innovaciones relacionadas a productos el 33% de los casos, lo que muestra un bajo rendimiento en cuestiones innovativas. Por su parte el grupo B se destaca en la realización de nuevos productos y servicios el 100% y 81,8%, y tiene un elevado desempeño salvo en mejora de procesos y nuevos modelos de comercialización (9,1%). Estos resultados se detallan en la Tabla 7.

*Tabla 7 Resultados de comportamiento hacia la innovación en cada grupo.*

| Comportamiento hacia la innovación / Grupo | A | B |
|---|---|---|
| a) Nuevos productos | 33,3% | 100,0% |
| b) Nuevos servicios | 0,0% | 81,8% |
| d) Productos con mejoras significativas | 0,0% | 54,5% |
| i) Obtuvo/Presentó Patentes | 0,0% | 54,5% |
| c) Nuevos procesos | 0,0% | 45,5% |

| | | |
|---|---|---|
| e) Servicios con mejoras significativas | 0,0% | 45,5% |
| h) Cambios organizacionales | 0,0% | 45,5% |
| j) Adquirió Patentes | 0,0% | 18,2% |
| f) Procesos con mejoras significativas | 0,0% | 9,1% |
| g) Nuevos modelos de comercialización | 0,0% | 9,1% |

En adopción de tecnologías, el grupo A utilizó procesos biotecnológicos y cultivos e ingeniería de células y tejidos, también hubo empresas de este grupo que realizaron esfuerzos en post de lo ambiental. Por su parte el grupo B en destaca en la realización de procesos biotecnológicos, técnicas relacionadas al ADN/ARN, manejo de proteínas y moléculas y cultivo de células y tejidos. En menor medida se da el uso de bioinformática y nano biotecnología. Es elevado el nivel de firmas de este grupo que realiza Medición y acciones en post de la reducción Impacto ambiental (81,80% ver Tabla 8).

*Tabla 8 Resultados de adopción de tecnologías en cada grupo.*

| Adopción de tecnologías / Grupo | A | B |
|---|---|---|
| e) Procesos biotecnológicos | 16,70% | 90,90% |
| h) Medición /reducción Impacto ambiental. | 16,70% | 81,80% |
| a) ADN/ARN | 0,00% | 54,50% |
| b) Proteínas y otras moléculas | 0,00% | 54,50% |
| c) Cultivo e ingeniería de células y tejidos | 16,70% | 54,50% |
| I) Inteligencia Artificial | 0,00% | 36,40% |
| f) Bioinformática | 0,00% | 27,30% |
| g) Nanobio tecnología | 0,00% | 27,30% |
| d) Transgénesis y vectores génicos | 0,00% | 9,10% |

La relación con instituciones de conocimiento evaluada mediante la relación por una parte con INTA y por otra parte con Universidades tanto nacionales como internacionales de los grupos es diferente. En el caso de A tiene un alto nivel de relación con INTA (66,7%) y una de cada tres firmas de este grupo se relaciona con universidades. En el grupo B ambos tipos de relación son superiores que los de A (Tabla 9).

*Tabla 9 Relación de los grupos con instituciones de conocimiento*

| | A | B |
|---|---|---|
| INTA | 66,7% | 81,8% |
| Universidades | 33,3% | 63,6% |

## 5. CONCLUSIONES

El estudio tiene una serie de limitaciones como el tamaño de la muestra lo que reduce la capacidad de generalizar los resultados a todo el sector y puede dejar fuera segmentos relevantes, por otro lado, el diseño transversal que no mide la evolución de la adopción tecnológica ni de la innovación en el tiempo. Y finalmente el enfoque cuantitativo del análisis de clúster y estadística descriptiva que si bien son apropiados a nivel exploratorio, no detallan en profundidad las motivaciones, barreras y estrategias internas de innovación mediante como los métodos cualitativos.

Tomando en cuenta las limitaciones y partir del análisis de resultados se encuentra que existe una correlación positiva y significativa ($r \approx 0,68$; $p < 0,01$) entre el nivel de adopción tecnológica y el comportamiento innovador: las empresas que más tecnologías incorporan también innovan más en productos, servicios y procesos.

Se identifican dos grupos (clústeres) con perfiles muy distintos: Grupo A (35,3%): bajo nivel de adopción tecnológica y escasa innovación (solo en productos y en un tercio de los casos), sin capital extranjero, exportan solo productos y tienen menor tamaño (81 empleados promedio). Grupo B (64,7%): alta adopción tecnológica, innovan en múltiples dimensiones (productos, servicios, procesos, cambios organizacionales), presencia significativa de capital extranjero, exportan tanto productos como servicios y tienen mayor tamaño (151 empleados promedio). El capital extranjero parece estar asociado a mayor adopción e innovación, dado que más de la mitad del Grupo B lo posee, mientras que en el Grupo A no hay presencia extranjera. Las empresas del Grupo B diversifican sus exportaciones incluyendo servicios, lo que puede ser una señal de servitización y de un modelo de negocio más sofisticado.

Las tecnologías más adoptadas son procesos biotecnológicos, medición/reducción de impacto ambiental y cultivo/ingeniería de células y tejidos. La IA está presente, pero en usos incipientes y administrativos. El vínculo con instituciones de conocimiento es más fuerte en las empresas más innovadoras: Grupo B muestra mayor relación con INTA (81,8%) y universidades (63,6%) frente a Grupo A (66,7% y 33,3%, respectivamente).

Se plantea para próximos estudios complementar con estudios cualitativos, analizar cómo se toman las decisiones de inversión en tecnológica y su impacto económico y competitivo. Destacando que tecnologías emergentes y transversales que pueden afectar al sector como herramientas con IA avanzada, análisis predictivo, automatización de procesos, IoT agrícola y trazabilidad digital. Y enfatizar el análisis de redes de cooperación y transferencia tecnológica

## 6. REFERENCIAS.


Castro, F., Chai, L., Arango, J., Owens, C., Smith, P. Reichelt, S., DuBois, C. (2023). Menconi, Poultry industry paradigms: connecting the dots, Journal of Applied Poultry Research, Volume 32, Issue 1, ISSN 1056-6171.

Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. International Journal of Production Economics, 210, 15–26.

Kim, W. K., A. K. Singh, J. Wang, and T. Applegate. (2022). Functional role of branched chain amino acids in poultry: a review. Poult. Sci. 101:101715.

Lepratte, L., Pietroboni, R., Blanc, R. & Hegglin, D. (2015). Socio-technical system innovation. An analysis of the dynamics of the poultry meat production sector in Argentina. Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad, 10(28), 57-83.

Lepratte, L.; Blanc, R y Hegglin, D. (2020). Innovación en la industria de nutrición y sanidad aviar de Argentina: estrategias de empresas intensivas en conocimiento. Mundo Agrario. Vol. 21 Núm. 47 (2020)

Mottet, A., & Tempio, G. (2017). Global poultry production: Current state and future outlook and challenges. World's Poultry Science Journal, 73(2), 245–256.

Muir, W. M., & Aggrey, S. E. (2014). Poultry genetics, breeding and biotechnology. CABI.

Müller, E., & Zenker, A. (2001). Business services as actors of knowledge transformation: The role of KIBS in regional and national innovation systems. Research Policy, 30(9), 1501–1516.

Oslo Manual (2018). Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, 4th Edition, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities, OECD Publishing, Paris/Eurostat, Luxembourg.

Wang, M., & Wang, H. (2022). Knowledge search and innovation performance: The mediating role of absorptive capacity. Operations Management Research, 15(1–2), 339–349.

# POLÍTICAS DE PROMOCIÓN INDUSTRIAL EN CÓRDOBA Y SU INCIDENCIA EN LA RADICACIÓN DE PARQUES INDUSTRIALES

Tavella, Marcelo; Alvarez, Luciana; Manera, Roxana

*Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional.*
*marceloandrestavella@gmail.com*

**RESUMEN**

En la provincia de Córdoba, la aprobación de parques industriales está regulada por la Ley Nº 7255 y sus modificatorias. La Ley Nº 7255 (Ley de Parques Industriales), fue sancionada el 26 de febrero de 1985 y se enfoca en la creación, promoción y administración de los parques industriales. Por su parte, en 1971 se sancionó la Ley provincial N° 5319, que se establece como una norma troncal en la materia de promoción industrial, siendo modificada y complementada por diferentes leyes hasta la actualidad. Es así que la Ley Nº 10792 (Ley de Promoción Industrial y Desarrollo de Clúster Productivos de Córdoba) aprobada en diciembre del 2021, se enfoca en la promoción y desarrollo industrial de las Pymes, incluyendo aquellas radicadas en parques industriales. Estas leyes han facilitado la radicación de empresas en áreas planificadas, han contribuido al ordenamiento territorial mediante la delimitación de zonas aptas para el desarrollo productivo, y han promovido sinergias productivas entre pequeñas y medianas industrias. A su vez, se ha mejorado el acceso a servicios básicos, lo cual incrementa la competitividad del sector industrial cordobés. La articulación entre el sector público y privado ha sido clave para consolidar este proceso.

El presente trabajo investiga la incidencia que tuvieron las leyes de promoción industrial y de parques industriales en la creación de los mismos en la provincia de Córdoba, así como también diversos aspectos vinculados a su implementación y evolución desde la sanción de estas normativas, sus leyes modificatorias, hasta la actualidad, recorriendo aspectos como crecimiento, extensión, localización estratégica, asociativismo y sostenibilidad. Esto permitió evidenciar que el marco legal vigente ha sido un factor determinante en el impulso del desarrollo industrial de la provincia. La planificación territorial, la infraestructura adecuada y el acompañamiento a las PyMEs configuran un modelo de crecimiento sostenible. Este análisis permite comprender el impacto real de estas políticas y sus proyecciones a futuro.

**Palabras Claves:** Parques Industriales, promoción industrial, sustentabilidad

**ABSTRACT**

In the province of Córdoba, Law No. 7255 and its amendments regulate the approval of industrial parks. Law No. 7255 (Industrial Parks Law) was enacted on February 26, 1985, and focuses on the creation, promotion, and management of industrial parks. Provincial Law No. 5319 was enacted in 1971, establishing it as a core law on industrial promotion and has been amended and supplemented by various laws to this day. Thus, Law No. 10792 (Córdoba Industrial Promotion and Development of Productive Clusters Law), approved in December 2021, focuses on the promotion and industrial development of SMEs, including those located in industrial parks. These laws have facilitated the establishment of companies in planned areas, contributed to territorial planning by delimiting zones suitable for productive development, and promoted productive synergies between small and medium-sized industries. At the same time, access to basic services has improved, increasing the competitiveness of Córdoba's industrial sector. Coordination between the public and private sectors has been key to consolidating this process.

This paper investigates the impact of industrial promotion and industrial park laws on the creation of industrial parks in the province of Córdoba, as well as various aspects related to their implementation and evolution since the enactment of these regulations and their amending laws, covering aspects such as growth, expansion, strategic location, associativism, and sustainability. This study demonstrates that the current legal framework has been a determining factor in driving the province's industrial development. Territorial planning, adequate infrastructure, and support for SMEs shape a model of sustainable growth. This analysis provides insight into the real impact of these policies and their future projections.

**Keywords:** Industrial parks, industrial promotion, sustainability

## 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, el asociativismo ha emergido como una estrategia adaptativa frente a los cambios en los sistemas económicos y sociales. Desde las primeras cooperativas surgidas en Europa durante el siglo XIX, centradas en la producción y el consumo solidario, hasta los actuales clústeres industriales, esta forma de organización colectiva ha demostrado ser un instrumento eficaz para enfrentar desafíos económicos complejos (Saquier, 2013).

En América Latina, el asociativismo ha tenido un rol protagónico en contextos de crisis y exclusión social, promoviendo el desarrollo territorial y fortaleciendo el tejido productivo local, como lo evidencian las cooperativas rurales de Brasil o los conglomerados textiles del centro de México (Altvater & Mahnkopf, 2002). En Argentina, experiencias como el Parque Industrial de Pilar (Buenos Aires) o el Parque Industrial de San Francisco (Córdoba) han permitido consolidar sectores productivos mediante la cooperación entre empresas, municipios y entidades intermedias, facilitando el acceso a tecnologías, logística y servicios comunes (Ministerio de Desarrollo Productivo, 2021). Estas iniciativas reflejan cómo el asociativismo no solo potencia capacidades individuales, sino que también permite alcanzar economías de escala, acceder a financiamiento conjunto y negociar en mejores condiciones ante actores institucionales. En síntesis, asociarse se traduce en fortalecer vínculos colectivos para construir una competitividad más equitativa y sostenible.

No existe un modelo óptimo que pueda ser utilizado en todas las circunstancias que se promueva un sistema asociativo sostenible, la selección del mismo depende de cada situación en particular, tendiéndose a la especificidad de cada territorio o sector a integrar (Tavella, González, & Miropolsky, 2008). La implementación de políticas públicas favorables al asociativismo supone una articulación efectiva entre los distintos niveles de gobierno y los actores involucrados, promoviendo un marco institucional que respalde la colaboración interempresarial.

No obstante, los desafíos del asociativismo en América Latina están marcados por la disparidad económica, la falta de confianza entre los actores y la debilidad institucional en algunos países. Estas barreras dificultan la implementación de modelos sostenibles y limitan el impacto positivo de las iniciativas asociativas. Superar estos obstáculos requiere de estrategias que fortalezcan la cultura de cooperación, impulsen la capacitación empresarial y generen incentivos para la asociatividad, tales como subsidios y beneficios fiscales.

En el sector de producción de bienes y servicios, el desarrollo está vinculado a la integración de cadenas de valor, tanto horizontal como vertical. En este contexto, la asociación se presenta como un mecanismo clave para que las empresas unan esfuerzos y enfrenten desafíos comunes. Aunque compleja, la asociatividad fortalece la competitividad mediante acciones conjuntas que benefician tanto al colectivo como a cada integrante. Para asegurar su perdurabilidad, es esencial que las asociaciones cuenten con un proyecto compartido, compromiso mutuo y objetivos claros, respetando la autonomía de cada participante (Liendo & Martínez, 2001).

Desde una perspectiva de planificación territorial, los agrupamientos industriales son espacios específicos diseñados para albergar actividades productivas y de servicios, promoviendo la organización y eficiencia en el uso del suelo (García & López, 2015). Un ejemplo destacado de asociativismo en este contexto se encuentra en los parques industriales, donde las empresas comparten servicios y recursos comunes, fomentando la colaboración y la optimización de sus operaciones (Martinez, López, & García, 2010). En los últimos años, los parques industriales y tecnológicos sostenibles han adquirido mayor relevancia en el contexto del desarrollo económico y ambiental. Estas comunidades promueven la cooperación entre empresas mediante el intercambio de información, materiales, residuos y energía, con el objetivo de mejorar su competitividad y reducir el impacto ambiental (López, Pérez & Torres, 2018; Banco Mundial, 1991). Estos modelos representan una evolución respecto a la concepción tradicional de parques industriales, integrando principios de economía circular y gestión colaborativa para minimizar desperdicios y maximizar la eficiencia en el uso de recursos (Smith & Johnson, 2012)

La innovación es otro elemento fundamental en relación con la sostenibilidad. Los modelos asociativos fomentan tanto la innovación colaborativa, mediante la creación de clústeres ad-hoc, como la innovación abierta, que busca soluciones novedosas a través de la consulta y colaboración entre sus miembros. Los clústeres asociados funcionan como redes horizontales que facilitan la cooperación entre empresas que comparten un mismo mercado o cadena de valor. Esta estructura permite a las empresas mantener un alto nivel de autonomía gerencial, lo cual resulta atractivo, ya que no se ven obligadas a compartir información confidencial. Además, la asociatividad brinda una gran flexibilidad en

sus objetivos, abarcando desde el financiamiento hasta la investigación conjunta (Olave Gutiérrez, 2005)

En este contexto, es importante destacar el papel de las Pequeñas y Medianas Empresas (PyMEs) en la generación de empleo, ingresos y riqueza. Sin embargo, debido a sus características estructurales, estas empresas suelen encontrarse en desventaja en recursos y capacidades en comparación con las grandes empresas, lo que representa dificultades significativas para su supervivencia y crecimiento (Estrada Bárcenas, García Pérez de Lema, & Sánchez Trejo, 2009) Por ello, consolidarse mediante modelos asociativos resulta especialmente valioso para ellas, permitiéndoles unir esfuerzos y obtener beneficios colectivos.

Cabe señalar que una de las principales características de las PyMEs argentinas, en general, es su bajo nivel de asociatividad. La mayoría de estas empresas operan de manera aislada y en competencia entre sí, sin aprovechar las ventajas que implica realizar prácticas conjuntas ni actuar como un grupo. Sin embargo, en los últimos tiempos, tanto el entorno empresarial local como el global están impulsando a las PyMEs a replantear su funcionamiento y a reconocer la asociatividad como una estrategia válida y necesaria para competir con las grandes empresas y lograr un desarrollo sostenido, además de mejorar su posicionamiento en el mercado (Lozano Monroy, 2010).

Las cámaras sectoriales y las asociaciones regionales del sector industrial constituyen un primer nivel de asociativismo empresarial, que se profundiza y perfecciona con emprendimientos y proyectos conjuntos de sus asociados. En este sentido, el asociativismo se ha convertido en un componente clave para potenciar los efectos de las leyes de promoción industrial, ya que facilita la articulación entre empresas, gobiernos locales y organizaciones intermedias.

Esta colaboración fortalecida permite aprovechar mejor los beneficios de dichas leyes, promoviendo un desarrollo más coordinado y eficiente en el sector industrial.

En la provincia de Córdoba, este enfoque colaborativo ha sido fundamental para el desarrollo de parques industriales y clústeres, tal como lo promueven normativas como la Ley Nº 7255 (1985) y la Ley 10.792 (2021). Estas leyes no solo otorgan beneficios fiscales y subsidios, sino que también reconocen la importancia de la gestión compartida y la planificación conjunta (Ministerio de Industria, Comercio y Minería de Córdoba, 2023). En este sentido, el asociativismo permite una mejor absorción de políticas públicas, fortaleciendo las capacidades territoriales y promoviendo un desarrollo más inclusivo y sostenible (Bertoncello & Kostzer, 2010). Así, la sinergia entre legislación promotora e iniciativas asociativas constituye una estrategia eficaz para dinamizar la actividad productiva regional.

Siguiendo con lo mencionado anteriormente y en relación con las leyes referidas, es importante destacar que en 1971 se sancionó la Ley provincial N° 5319, que se establece como una norma troncal en la materia de promoción industrial, siendo modificada y complementada por diferentes leyes hasta la actualidad.

Así es como, en el año 2009 se aprobó la Ley N° 9727 (Programa de Promoción y Desarrollo Industrial de Córdoba, 2009), conocida como la Ley de Promoción de las PyMEs industriales de Córdoba, que fue prorrogada por sucesivos períodos mediante las Leyes N° 10239 y N° 10434, culminando su vigencia el 31 de diciembre de 2021 (art. 36 de la Ley 9727, texto modificado).

Finalmente, la Legislatura Provincial aprobó una nueva ley a propuesta del Poder Ejecutivo Provincial, la Ley N° 10792 (2021), denominada Ley de Promoción Industrial y Desarrollo de Clústeres Productivos de Córdoba. Esta ley busca modernizar y actualizar la legislación anterior, ya que introduce un concepto innovador en política pública de desarrollo industrial: la promoción de la formación de clústeres productivos.

Si bien en la Ley N° 5319 (art 3° inc. 8°) ya se preveía la promoción de actividades industriales que se realicen en establecimientos industriales localizados en Parques Industriales creados o aprobados por Ley Provincial, en la última Ley N° 10792 se otorgan beneficios adicionales.

Entre estos beneficios se incluyen exenciones por quince (15) años en el pago del Impuesto sobre los Ingresos Brutos, Impuesto de Sellos e Impuesto Inmobiliario, además de una extensión de siete años en los subsidios para la contratación de mano de obra y en el consumo eléctrico incremental. En contraste, las normas anteriores no contemplaban tratamientos especiales para las empresas, permitiendo que estas gozaran de los mismos beneficios tanto si se radicaban en un Parque Industrial como fuera de él.

En cuanto al fomento al asociativismo industrial, la Ley N° 9727 en sus capítulos 19 y 20 ya preveía herramientas para la promoción de la conformación de grupos asociativos de empresas, pudiendo

participar entidades públicas, académicas, científicas y/o tecnológicas, para fines determinados. En la Ley N° 10792 se ha acentuado este aspecto ofreciendo en su Capítulo V (art. 16, 17, 18 y 19) el apoyo a la creación y consolidación de clústeres industriales.

En este trabajo, se analiza la evolución de los parques industriales desde sus inicios en 1971 hasta la actualidad, poniendo especial énfasis en el impacto de las leyes de promoción industrial en su desarrollo. Se explora cómo estas leyes han influido en la estructura, funciones y contribución de los parques al crecimiento regional. A través de este recorrido, se busca entender cómo las políticas de promoción han ayudado a los parques a adaptarse a las necesidades del entorno y qué factores legales han impulsado su crecimiento y transformación.

Este análisis permitirá contextualizar tanto los aspectos históricos como los actuales, sirviendo como base para profundizar en los diferentes aspectos que serán abordados en los siguientes apartados.

## 2. METODOLOGÍA

El relevamiento de información sobre los parques industriales aprobados en la provincia de Córdoba desde 1971 hasta 2023 se realizó mediante un enfoque que combina la consulta de fuentes secundarias oficiales y la recolección de datos documentales. El objetivo fue recabar datos sobre la cantidad de parques industriales existentes en la provincia y analizar la evolución y aprobación de estos a lo largo de un período de 53 años, desde el primer parque industrial aprobado en 1971 hasta la última aprobación definitiva del año 2023.

En primer lugar, se revisaron los registros del Ministerio de Industria, Comercio y Minería de Córdoba (2023) y del portal del Ministerio de Producción, Ciencia e Innovación (2023). Esto permitió identificar un total de 60 parques industriales aprobados y en operación desde 1971.

Además, se consultaron actas de aprobación y registros del Registro Provincial de Parques Industriales, disponibles en plataformas digitales del gobierno provincial y en archivos públicos. (Ministerio de Industria, Comercio y Minería de Córdoba, 2019)

Paralelamente, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de publicaciones académicas, informes técnicos y boletines oficiales que documentan la evolución y características de estos parques, buscando complementar la información oficial con análisis contextuales y datos históricos relevantes (Martínez, 2019)

Para el procesamiento de la información recopilada, se desarrolló una base de datos en Excel que facilitó la organización y análisis de los datos de manera estructurada y eficiente. Esta base permitió clasificar los parques industriales según diversos criterios, incluyendo la década en la que fueron aprobados, su ubicación geográfica dentro de la provincia de Córdoba, y la superficie total de cada parque expresada en hectáreas. Además, se registró la actividad industrial que predomina en cada parque, así como el tipo de administración que los rige, diferenciando entre gestión pública, privada o mixta. También se consignó si el ente promotor responsable de la aprobación y gestión del parque es la municipalidad del departamento correspondiente, y si el parque cuenta con lotes disponibles para nuevos emprendimientos, entre otros aspectos relevantes.

Para garantizar la rigurosidad y precisión del relevamiento, se empleó una estrategia que consistió en consultar diferentes fuentes oficiales y documentales para realizar validaciones cruzadas de los datos obtenidos. Este proceso permitió verificar la consistencia y fiabilidad de la información, asegurando que los datos recolectados fueran precisos y confiables. Todo el procedimiento se llevó a cabo siguiendo criterios de transparencia y reproducibilidad, con el fin de que los resultados puedan ser revisados y replicados en futuras investigaciones, fortaleciendo así la credibilidad del análisis realizado.

A continuación, en la Tabla 1 se presenta un listado detallado de los 60 parques industriales que fueron relevados en el estudio, discriminando cada parque según el departamento al que pertenece, lo que permite una visión geográfica precisa de su distribución en la provincia, y el porcentaje que representa esa distribución para cada departamento.

*Tabla 1 Distribución y porcentajes de parques industriales por departamento*

| Departamento / Porcentaje | Parques Industriales |
|---|---|
| **Departamento San Justo** | 1. Parque Industrial Piloto San Francisco.<br>2. Parque Industrial Morteros.<br>3. Parque Industrial Regional del Noreste Cordobés |

| | |
|---|---|
| **10%** | 4. Parque Industrial La Paquita.<br>5. Parque Industrial, Tecnológico y Educativo de Alicia.<br>6. Parque Industrial Freyre. |
| **Departamento Tercero Arriba<br>5%** | 1. Parque Industrial Leonardo Da Vinci.<br>2. Parque Industrial Leonardo Da Vinci Fase II.<br>3. Parque Industrial Hernando. |
| **Departamento Rio Segundo<br>10%** | 1. Parque Industrial Luque.<br>2. Parque Industrial Villa del Rosario.<br>3. Parque Industrial Pozo del Molle.<br>4. Parque Industrial Villa del Rosario Fase II.<br>5. Parque Industrial Calchin.<br>6. Parque Industrial Matorroles. |
| **Departamento Juarez Celman<br>7%** | 1. Parque Industrial Intendente Roberto D. Grosso.<br>2. Parque Industrial Ucacha.<br>3. Parque Industrial Adrián P. Urquía.<br>4. Parque Industrial y Logístico COPESP. |
| **Departamento General San Martin<br>7%** | 1. Parque Industrial Logístico y Tecnológico Villa María S.E.M.<br>2. Parque Industrial Arroyo Cabral.<br>3. Parque Industrial Chazón.<br>4. Parque Industrial Ausonia. |
| **Departamento Río Cuarto<br>10%** | 1. Parque Industrial Río Cuarto Presidente Arturo Frondizi.<br>2. Parque Industrial y Tecnológico Santa Catalina de Holmberg.<br>3. Parque Industrial Eva Duarte Perón Alcira Gigena.<br>4. Parque Industrial CECIS.<br>5. Parque Industrial Sampacho.<br>6. Parque Industrial Arturo Frondizi 2. |
| **Departamento Santa María<br>8%** | 1. Polígono Industrial Malagueño Fase 1.<br>2. Polígono Industrial Malagueño Fase 2.<br>3. Polo Industrial Malagueño.<br>4. Parque Industrial Toledo.<br>5. Parque Pyme Alta Gracia. |
| **Departamento Marcos Juárez<br>12%** | 1. Parque Industrial Corral de Bustos Ifflinger.<br>2. Emprendimiento Productivo Leones.<br>3. Emprendimientos Productivos Noetinger.<br>4. Parque Industrial Marcos Juárez.<br>5. Parque Industrial Los Surgentes.<br>6. Parque Industrial Arias.<br>7. Parque Industrial Tecnológico y Educativo Monte Buey. |
| **Departamento Unión<br>10%** | 1. Parque Industrial Ordoñez.<br>2. Parque Industrial Bell Ville.<br>3. Parque Industrial Morrison.<br>4. Parque Industrial Justiniano Posse.<br>5. Parque Industrial Cintra.<br>6. Parque Industrial Alto Alegre. |
| **Departamento Presidente Roque Sáenz Peña<br>3%** | 1. Parque Industrial de Laboulaye.<br>2. Parque Industrial Serrano. |
| **Departamento Colón<br>5%** | 1. Parque Industrial Mi Granja.<br>2. Parque Industrial, Tecnológico y de Servicios de Villa Allende.<br>3. Parque Industrial, Logístico y Tecnológico Mendiolaza. |
| **Departamento Capital<br>7%** | 1. Parque Industrial Ferreyra.<br>2. Parque Industrial CACEC.<br>3. Parque Empresarial Aeropuerto.<br>4. Parque Industrial Polo 52. |
| **Departamento Calamuchita:<br>3%** | 1. Parque Industrial, Tecnológico y de Servicios de Villa General Belgrano.<br>2. Parque Industrial Santa Rosa de Calamuchita. |
| **Departamento Rio Primero:<br>2%** | 1. Parque Industrial La Para. |
| **Departamento Cruz del Eje<br>2%** | 1. Parque Industrial, de Servicios y Polo Tecnológico Cruz del Eje. |

En los siguientes apartados se analizará en profundidad aspectos relacionados con la distribución geográfica, tipo de administración entre otros a fin de obtener conclusiones relevantes de la evolución e impacto de estas leyes en el desarrollo de los parques.

## 3. DESARROLLO.

En relación a la base de datos obtenida, un primer paso para este estudio se vincula a la distribución geográfica de los parques en la provincia de Córdoba discriminado por departamento.

Como puede observarse en la Figura 1, los parques industriales se concentran principalmente en la zona Este y Sur de la provincia de Córdoba. Esta distribución puede responder a diversos factores económicos, logísticos y estratégicos. La zona Este, por ejemplo, cuenta con una infraestructura vial más desarrollada, incluyendo accesos a autopistas (Autopista Córdoba-Rosario) y ferrocarriles, como ser Trenes Argentinos Cargas (Línea Belgrano y Línea San Martín) que facilitan el transporte de insumos y productos terminados (Ministerio de Industria, Comercio y Minería de Córdoba, 2019). Además, estas áreas están cercanas a centros urbanos importantes, como la ciudad de Córdoba, lo que favorece la disponibilidad de mano de obra y servicios, así como la integración con otros sectores económicos.

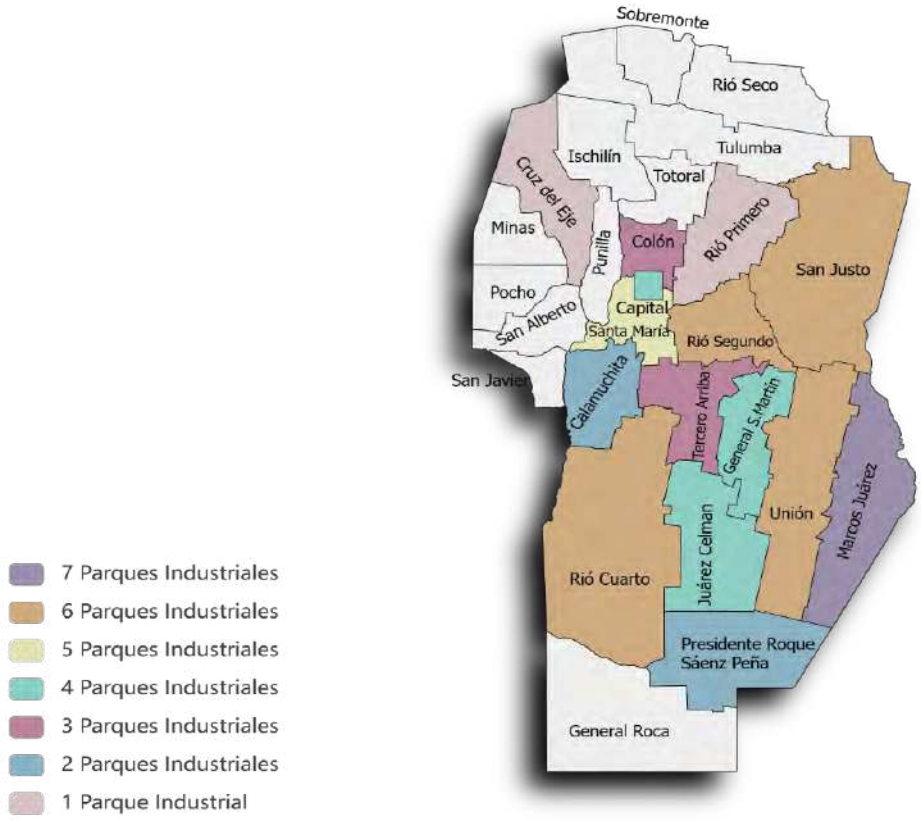



*Figura 1: Cantidad de Parques Industriales por Departamento*

Otro aspecto relevante a considerar es la distribución de los parques industriales en función del año en que fueron aprobados. Este enfoque resulta especialmente importante, ya que permite analizar cómo la cronología de la aprobación de estos parques se relaciona con la sanción de distintas leyes a lo largo del tiempo. La relación entre estos dos factores puede ofrecer una visión más clara sobre el impacto que tuvieron las normativas en la radicación de industrias en los parques industriales. En otras palabras, comprender en qué años se aprobaron los parques industriales y cómo estos momentos coinciden con el estudio y la promulgación de leyes específicas ayuda a entender mejor las dinámicas de desarrollo industrial y las políticas públicas que los han favorecido o condicionado. Este análisis puede revelar patrones y tendencias en la expansión de la infraestructura industrial, así como la influencia de los marcos legales en la planificación y crecimiento de estos espacios.

Según datos suministrados por el Ministerio de Producción, Ciencia e Innovación a través de su portal de la Secretaría de Parques Industriales, durante los primeros 50 años del período analizado se aprobó casi el 50% de los parques industriales que actualmente existen en la provincia de Córdoba. Esto indica que aproximadamente la mitad de los parques industriales en la provincia fueron establecidos en ese período inicial, reflejando una etapa de crecimiento y consolidación del sector industrial en la región. El

restante porcentaje de parques fue aprobado en un período de tan solo cuatro años, lo que evidencia un aceleramiento en la creación y aprobación de estos espacios en un período relativamente corto. Esta distribución acumulada de parques industriales a lo largo del tiempo puede observarse claramente en la tabla 2 y en la gráfica de la Figura 2, que ilustra la evolución temporal de las aprobaciones.

*Tabla 1: Cantidad de parques aprobados por año.*

| Año de aprobación | Parques aprobado por año | Valor acumulado |
|---|---|---|
| 1971 | 1 | 1 |
| 1978 | 1 | 2 |
| 1981 | 1 | 3 |
| 1992 | 1 | 4 |
| 1998 | 1 | 5 |
| 1999 | 1 | 6 |
| 2015 | 2 | 8 |
| 2016 | 1 | 9 |
| 2018 | 1 | 10 |
| 2020 | 17 | 27 |
| 2021 | 13 | 40 |
| 2022 | 10 | 50 |
| 2023 | 10 | 60 |

En cuanto a los períodos específicos, entre 1971 y e inicios del 2020, en promedio se aprobaba un parque industrial cada dos años, lo que refleja un ritmo de crecimiento relativamente estable y moderadamente bajo, durante varias décadas. Si lo vemos en términos de un modelo de regresión lineal, la línea de tendencia muestra una pendiente positiva de 0,1616, que significa un incremento muy suave por cada año transcurrido (en este caso significa que se aprueban 0,1616 parques industriales más que el año anterior). Sin embargo, a partir del año 2020, y hasta 2023, se evidenció un incremento abrupto en la aprobación de parques industriales, con un promedio de 25 parques aprobados bianualmente. En este caso, la línea de tendencia muestra un cambio radical respecto a la de los años anteriores, con una pendiente de 10,9, lo que indica un crecimiento del 2500 % del promedio de aprobación anual respecto comportamiento del período anterior.

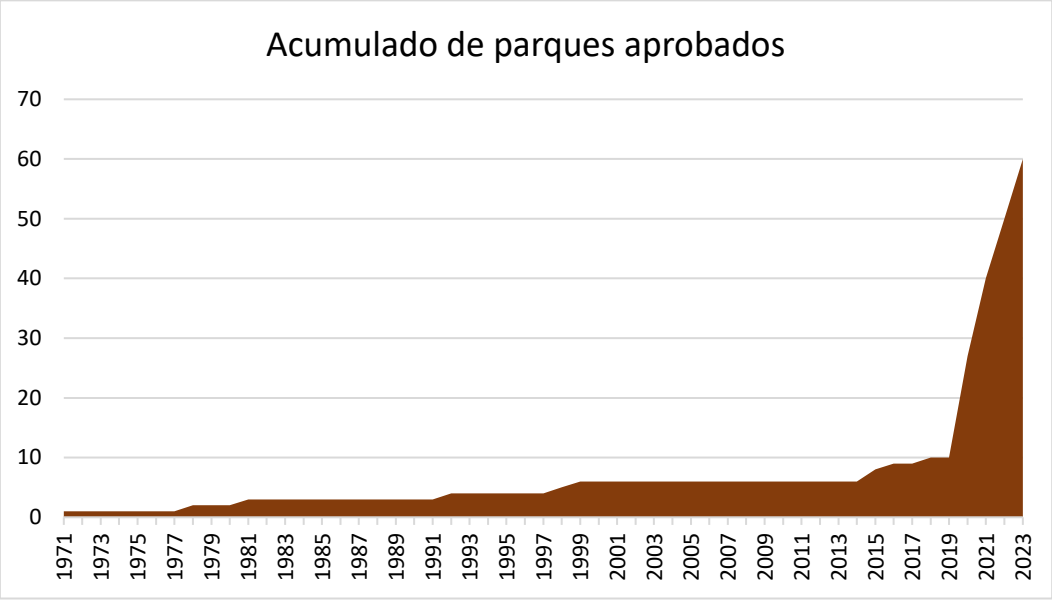



*Figura 2: Acumulado de parques industriales aprobados desde 1971 a 2023*

Este notable aumento en la aprobación de parques industriales en los últimos años está claramente relacionado con cambios en el marco legal y normativo a nivel provincial.

El primer parque industrial aprobado en la provincia de Córdoba fue el Parque Industrial Tecnológico y Logístico de San Francisco, que es considerado el Parque PyME más importante del interior de la provincia y del país, se fundó en 1971, coincidiendo con la fecha de sanción de la Ley Nº 5319 (primera norma de promoción industrial que otorgaba beneficios a empresas que se radicaran en parques industriales).

La Ley N° 7255, conocida como la Ley Provincial de Parques Industriales, sancionada en 1985, ha sido fundamental para regular y promover estos espacios, estableciendo los requisitos, beneficios y obligaciones necesarios para su desarrollo y gestión. Estas leyes ocasionaron un ordenamiento en las normativas de parques industriales, pero no promovieron visiblemente la creación de nuevos parques industriales, ya que a la fecha de sanción de la Ley Nº 7255 en 1985 (catorce años después), solo se habían aprobado dos parques más, a saber: el Parque Industrial Río Cuarto Presidente Arturo Frondizi en 1978 y el Parque Industrial Leonardo Da Vinci de Río Tercero en 1981.

Posteriormente, en 2009, se sancionó la Ley N° 9727, conocida como el Programa de Promoción y Desarrollo Industrial de Córdoba, que ha sido un instrumento clave para fomentar la creación y expansión de las PyMEs industriales en la provincia, convirtiéndose en la segunda ley troncal de Promoción Industrial. Es de destacar que hasta el momento de sanción de esta ley (2009), sólo se habían aprobado en la provincia seis parques industriales, y que hasta inicios del 2020 la provincia contaba con diez parques industriales aprobados. Esta ley mantuvo su vigencia hasta finales del 2021 mediante sucesivas prórrogas.

En noviembre de 2019 se sancionó la Ley N° 10674, modificatoria de la Ley N° 7255 de parques industriales, tendiendo a facilitar el trámite de aprobación definitiva de los parques industriales provinciales.

Por otro lado, a principios del 2020 se empezó a gestar una nueva ley de promoción industrial que reemplazaría a la Ley N° 9727, que además de la continuar la promoción de las PyMEs industriales, incrementó significativamente los beneficios a las empresas que se radicaran en parques industriales e impulsó la creación de Clústeres Productivos en la provincia de Córdoba, sancionándose en la Legislatura Provincial como Ley N° 10792, en el año 2021.

La sanción de la Ley Nº 10674, a finales de 2019 junto a las modificaciones que se comenzaron a discutir de la Ley de Promoción Industrial y Desarrollo de Clústeres Productivos de Córdoba (Ley N° 10792) y su posterior implementación, han contribuido sinérgicamente para producir un significativo cambio en la tendencia de aprobación de parques industriales, como se puede observar en la gráfica de la figura precedente.

Según una entrevista realizada en el año 2023 al Secretario de Industria de la Provincia de Córdoba: Mg. Lic. Fernando Sibilla, a principios del 2020 cuando estaba próxima a vencerse la vigencia de la anterior Ley, se realizaron reuniones de trabajo para el diseño y la consolidación de la nueva Ley, que incluiría mayores beneficios para las empresas que la anterior e incorporaría un concepto novedoso para la provincia y el país, el desarrollo de Clústeres industriales.

De tal manera se conformaron equipos de trabajo donde intervinieron distintas áreas del poder ejecutivo provincial como el Ministerio de Industria, la Secretaria de Ambiente, el Ministerio de Ciencia y Tecnología y la Agencia de Comercio Exterior de Córdoba, como así también, las diferentes administraciones municipales interesadas y la Unión Industrial de Córdoba, a través de las cámaras empresariales sectoriales que la componen. Finalmente, el proyecto fue presentado a la Legislatura donde fue aprobada masivamente y sancionada a finales del año 2021.

Esta actividad participativa permitió la difusión de los nuevos aspectos que contemplaría la Ley, por parte de los municipios y de las cámaras y asociaciones empresariales, generando un fuerte impulso en la creación de parques industriales, ya que sólo en el año 2020 fueron aprobados en la provincia 17 nuevos parques industriales.

Por otra parte, a nivel nacional, la Ley N° 21.608 de promoción industrial, sancionada en 1977, ha incentivado la radicación de industrias en parques industriales mediante beneficios fiscales, exenciones y programas de apoyo financiero, más allá de que la citada ley, en su art. Nº 20, excluyera parcialmente a la provincia de Córdoba. Estas leyes nacionales han complementado las políticas provinciales y municipales, creando un entorno favorable para la expansión de parques industriales en todo el país.

Además, han sido acompañadas por sucesivos decretos complementarios, como el Decreto N° 915/2010 y el Decreto N° 716/2020, cuyo principal objetivo fue la creación y fortalecimiento del Programa Nacional para el Desarrollo de Parques Industriales. Sin embargo, esta política pública nacional se ha discontinuado, derogándose los citados decretos en 2023 mediante el decreto DNU, Nº 70/2023 (Decreto de Necesidad y Urgencia, 2023).

En resumen, el incremento en la aprobación de parques en los últimos años puede interpretarse como resultado de una mayor articulación entre las políticas públicas multi-escalares (nacionales, provinciales y municipales) que han promovido un marco legal propicio para la inversión y el desarrollo industrial, y las cámaras y asociaciones del sector productivo. La implementación de estas leyes ha facilitado la planificación, financiamiento y gestión de parques industriales, impulsando un crecimiento acelerado en la región y contribuyendo al desarrollo económico y social de Córdoba.

En la misma línea se investigó acerca del tipo de administración de los parques industriales, la cual puede variar dependiendo de su tipo de propiedad y objetivos, pero generalmente involucra la gestión de la infraestructura, servicios, promoción y relaciones con los usuarios del parque y el cumplimiento normativo.

Los parques industriales pueden ser de gestión pública, en tal caso lo gestiona el ente municipal correspondiente, de gestión mixta, es decir, una combinación de entidades públicas y privadas, o de gestión privada, en donde el parque industrial es gestionado por una empresa privada, que puede ser el propietario del terreno o un administrador contratado.

En el contexto de este estudio, los datos obtenidos, representados en la Figura 3, revelan que la mayoría de los parques industriales, un 64% son gestionados de manera pública, Esto refleja una tendencia histórica en la administración de estos espacios, vinculada a políticas municipales de desarrollo urbano que buscan promover el asentamiento de industrias en áreas aptas para tal fin. Por otro lado, un 23 % de los parques son gestionados por entidades privadas, lo que indica la existencia de un sector privado activo en la administración y operación de estos parques, seguramente motivado por intereses comerciales y de inversión. Además, un 13% corresponde a modelos de gestión mixta, que combinan sinergias y eficiencia en la gestión de estos espacios.




*Figura 3: Distribución según el tipo de Gestión*

Un aspecto interesante a analizar es la relación entre el tipo de gestión y el año de aprobación de los parques. Según la información previa, aproximadamente la mitad de los parques fueron aprobados entre 1971 y 2019, y el restante 50% en los cuatro años posteriores.

En ambos períodos, la gestión pública municipal mantuvo una presencia predominante en porcentajes similares, lo que indica una continuidad en las políticas y enfoques de gestión a lo largo del tiempo. Sin embargo, en los últimos años, se observa un incremento en la participación de la gestión mixta, en comparación con los primeros 50 años. Esto puede interpretarse como una tendencia hacia modelos de gestión más diversificados y colaborativos, que buscan aprovechar las ventajas de ambos sectores para optimizar la administración, mejorar la calidad de los servicios y adaptarse a las necesidades cambiantes del entorno industrial. Además, esta tendencia podría reflejar una mayor apertura al

asociativismo público-privado y a la innovación en la gestión de parques industriales, promoviendo un desarrollo más sostenible y competitivo en el largo plazo.

En conjunto, estos datos sugieren una evolución en las estrategias de gestión, con un movimiento hacia modelos más flexibles y colaborativos que podrían potenciar el crecimiento y la eficiencia de los parques industriales en el futuro

## 4. CONCLUSIONES.

Como conclusión al presente trabajo podemos afirmar que el asociativismo ha sido una estrategia clave para fortalecer la cooperación y competitividad en diferentes contextos económicos y sociales, especialmente en América Latina y Argentina. Aunque enfrenta desafíos como la disparidad económica y la falta de confianza, su potencial para promover el desarrollo territorial, la innovación y la sostenibilidad es significativo. En particular, en Córdoba, las leyes de promoción industrial y la creación de parques industriales y clústeres han impulsado la colaboración entre empresas y actores públicos, facilitando beneficios fiscales y fortaleciendo la gestión conjunta. La evolución de estas políticas y modelos asociativos demuestra que, con un marco institucional adecuado y compromiso mutuo, el asociativismo puede ser un motor efectivo para el crecimiento económico inclusivo y sostenible en la región.

En referencia a los parques industriales en la provincia de Córdoba, su concentración en las zonas Este y Sur de la provincia responde a factores estratégicos relacionados con la infraestructura vial, la proximidad a centros urbanos y la disponibilidad de recursos humanos y servicios. Estas condiciones favorecen la logística eficiente y la integración económica, consolidando dichas áreas como polos de desarrollo industrial en la región.

Por otro lado, el análisis de la distribución temporal de los parques industriales en Córdoba revela un patrón de crecimiento que se ha acelerado en los últimos años, especialmente en el período comprendido entre 2020 y 2023. Aproximadamente la mitad de los parques existentes en la provincia fueron aprobados en los primeros 50 años, reflejando una etapa inicial de consolidación del sector industrial. Sin embargo, en un período relativamente corto, se evidenció un incremento significativo en la aprobación de nuevos parques, lo cual está estrechamente relacionado con la implementación de marcos legales específicos. La sanción en 2021 de la Ley N° 10792, que regula la creación de parques y clústeres productivos, aunado a la sanción a finales de 2019 de la Ley Nº 10674 modificaba los requisitos de la Ley 7255 (1985) para la aprobación definitiva de parques industriales, ha sido especialmente relevante, ya que ha impulsado un crecimiento acelerado en la región. A nivel nacional, leyes de promoción industrial, como la Ley N° 21.608 de 1977, junto con decretos complementarios, han fortalecido este proceso, creando una base sólida y entorno propicio para la inversión y expansión industrial.

Este incremento en la aprobación de parques en los últimos años puede interpretarse como resultado de una mayor articulación entre las políticas públicas multi-escalares con el sector empresarial, que han facilitado la planificación, financiamiento y gestión de estos espacios. En conjunto, estas políticas y marcos legales han sido fundamentales para impulsar un desarrollo sostenible del sector industrial en Córdoba, contribuyendo de manera significativa al desarrollo económico y social de la región.

Por último, con respecto al tipo de administración, la gestión de los parques industriales ha estado mayoritariamente en manos del sector público, lo que refleja una tendencia histórica hacia la administración municipal de estos espacios. Sin embargo, en los últimos años se ha observado un incremento en la adopción de modelos de gestión mixta, lo que indica una evolución hacia enfoques más colaborativos y diversificados. Esta tendencia sugiere que las instituciones están reconociendo los beneficios de combinar recursos y saberes tanto del sector público como del privado para optimizar la infraestructura, mejorar los servicios ofrecidos y fortalecer las relaciones con los usuarios.

La diversificación en los modelos de gestión puede contribuir a una mayor eficiencia, adaptabilidad y sostenibilidad en el desarrollo de los parques industriales, permitiendo responder mejor a las demandas cambiantes del entorno económico y social.

## 5. REFERENCIAS.(s.f.).

Altvater, E., & Mahnkopf, B. (2002). *Globalizacion de la economía: nuevas formas de regulacion.* Icaria.

Banco Mundial. (1991). Industrial parks: A review of their role and impact.

Bertoncello, M., & Kostzer, D. (2010). Clústeres y desarrollo territorial en Argentina: Entre la planificacion estatal y la iniciativa local. *Revista Realidad Económica*, (259), 65-89.

Decreto DNU 70/2023. (2023). BASES PARA LA RECONSTRUCCION DE LA ECONOMIA ARGENTINA.

Decreto Nº 716/2020. (2020). Programa Nacional para el desarrollo de Parques Industriales.

Decreto Nº 915/2010 . (2010). Programa Nacional para el Desarrollo de Parques Industriales Públicos. Economías Regionales.

Estrada Bárcenas, R., García Pérez de Lema, D., & Sánchez Trejo, V. (2009). Factores determinantes del éxito competitivo en la PyME: Estudio Empírico en México. *Revista Venezolana de Gerencia, 14*(46), 169-182.

García, P., & López, R. (2015). *Planificación territorial y desarrollo industrial.* Universitaria.

Ley Nº 10674. (2019). Modificación de la Ley N° 7255.

Ley Nº 10792. (2021). Ley de Promocion Industrial y Desarrollo de Clústeres Productivos de Córdoba. Córdoba, Argentina.

Ley Nº 21.608. (1977). Ley nacioneal de Industria - Promoción Industrial.

Ley Nº 5319. (1971). Ley Provincial de Promocion Industrial.

Ley Nº 7255. (1985). Ley Provincial de Parques Industriales. Córdoba, Argentina.

Ley Nº 9727. (2009). Programa de Promoción y Desarrollo Industrial de Córdoba.

Liendo, M., & Martínez, A. (2001). Asociatividad: Una alternativa para el desarrollo y crecimiento de las PYMeS. *Sextas Jornadas de Invetigaciones .* Rosario. Santa Fe. Argentina: Facultad de Ciencias Económicas y Estadísticas de la Universidad Nacional de Rosario.

López, A., Pérez, M., & Torres, J. (2018). Gestión de parques industriales sostenibles: estrategias y beneficios. *Revista de Desarrollo Sostenible*, 12(3), 45-60.

Lozano Monroy, F. (2010). La asociatividad como modelo de gestión para promover las exportaciones en las pequeñas y medianas empresas en Colombia. *Revista de Relaciones Internacionales, Estrategia y Seguridad, 5*(2), 161-191.

Martinez, J., López, R., & García, P. (2010). El asociativismo empresarial y su impacto en la optimizacion de recursos. *Revista de Estudios Industriales*, 15(2), 45-60.

Martinez, L. (2019). Evolución de los parques industriales con Córdoba: un análisis documental. *Revista de Estudios Regionales*, 15 (2), 45-60.

Ministerio de Desarrollo Productivo. (2021). *Parques Industriales: Impulsores del desarrollo productivo regional. Gobierno de Argentina*. Obtenido de https://www.argentina.gob.ar/produccion/parquesindustriales

Ministerio de Industria, Comercio y Minería de Córdoba. (2019). Informe de infraestructura y desarrollo industrial en Córdoba. Obtenido de https://industria.cba.gov.ar/informes/informe-infraestructura-2019

Ministerio de Industria, Comercio y Minería de Córdoba. (2023). *Guía de parques industriales y leyes de promoción.* Gobierno de la Provincia de Córdoba. Obtenido de https://industria.cba.gov.ar/parques-industriales/

Ministerio de Producción, Ciencia e Innovacion. (2023). Parques Industriales en Córdoba. Datos y Estadísticas. Obtenido de https://industria-cba.maps.arcgis.com/apps/dashboards/ded81ce5b5ee4c3490287f6f9653ed89

Olave Gutiérrez, J. (2005). Propuesta de un modelo asociativo de gestión exporadora a partir del análisis del sector de confecciones del departamento del Atlántico. *Pensamiento & Gestión*(N. 19), 141-199.

Saquier, M. (2013). Asociativismo y economía social en América Latina: Límites y posibilidades. *Revista de Ciencias Sociales*, 25(32), 45-66).

Secretaría de Industria. (2022). *Informe sobre parques industriales aprobados y en funcionamiento.* Obtenido de https://cordobaproduce.cba.gov.ar/secretaria-industria/

Smith, J., & Johnson, K. (2012). Economia circular y gestión colaborativa en parques industriales. *Journal of Sustainable Industry*, 8(2), 123-135.

Tavella, M., González, G., & Miropolsky, A. (2008). Los parques industriales como estrategia para el desarrollo sustentable en ciudades de la Provincia de Córdoba. En F. A. Delgadino, *Municipios y servicios públicos: Herramientas para el desarrollo.* Córdoba, Argentina: FCEFyN - U.N.C.

# INTEGRACIÓN DE PROCESS MINING E IOT EN LA INDUSTRIA 4.0: IMPULSANDO LA EFICIENCIA OPERATIVA DESDE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL

Rouillon, Esteban José

*Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario*
estebanjrouillon@gmail.com

**RESUMEN**

El Process Mining (PM) se consolida como una herramienta tecnológica clave dentro del paradigma de la Industria 4.0, adquiriendo una relevancia creciente en el campo de la Ingeniería Industrial. A su vez, la digitalización industrial — impulsada por tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) — permite acceder a grandes volúmenes de datos en tiempo real, lo cual abre nuevas oportunidades para optimizar procesos productivos.

Esta investigación destaca la importancia del PM como tecnología fundamental para mejorar la eficiencia operativa, especialmente cuando se integra con dispositivos IoT. Esta combinación permite detectar ineficiencias, como cuellos de botella y fallas en los sistemas, favoreciendo una producción más inteligente, adaptable y flexible.

La Industria 4.0 representa una nueva era de automatización y colaboración entre humanos y máquinas, pero también trae consigo una mayor complejidad en los procesos y un volumen creciente de datos. En este contexto, el PM se presenta como una solución eficaz para enfrentar estos desafíos, al permitir la visualización de procesos reales, la identificación de oportunidades de mejora y la formulación de estrategias basadas en evidencia.

El estudio propone un enfoque basado en la revisión bibliográfica y en el análisis de casos concretos que ilustran la integración efectiva de tecnologías IoT con herramientas de PM. Además, se pondrá un foco especial en los beneficios específicos que esta sinergia aporta a la Ingeniería Industrial, fortaleciendo la toma de decisiones informada y la mejora continua de los sistemas productivos.

**Palabras Claves:** Process Mining; Industria 4.0; Internet de las Cosas (IoT); Eficiencia Operativa; Mejora continua

**ABSTRACT**

Process Mining (PM) is consolidating its position as a key technological tool within the Industry 4.0 paradigm, acquiring increasing relevance in the field of Industrial Engineering. In turn, industrial digitalisation - driven by emerging technologies such as the Internet of Things (IoT) - allows access to large volumes of data in real time, which opens up new opportunities to optimise production processes.

This research highlights the importance of PM as a key technology for improving operational efficiency, especially when integrated with IoT devices. This combination enables the detection of inefficiencies, such as bottlenecks and system failures, leading to smarter, more adaptive and flexible production.

Industry 4.0 represents a new era of automation and collaboration between humans and machines, but it also brings with it increased process complexity and a growing volume of data. In this context, PM presents itself as an effective solution to meet these challenges by enabling the visualisation of real processes, the identification of improvement opportunities and the formulation of evidence-based strategies.

The study proposes an approach based on a literature review and the analysis of concrete cases that illustrate the effective integration of IoT technologies with PM tools. In addition, a special focus will be put on the specific benefits that this synergy brings to Industrial Engineering, strengthening informed decision making and continuous improvement of production systems.

**Keywords:** Process Mining; Industry 4.0; Internet of Things (IoT); Operational Efficiency; Continuous Improvement

## 1. INTRODUCCIÓN

La digitalización está revolucionando radicalmente no solo la forma en la que las organizaciones toman decisiones sino también cómo realizan y gestionan sus operaciones. En dicho contexto, el paradigma de la Industria 4.0, incorporado por primera vez en el año 2011 en Alemania (Kagermann et al. 2013), resulta tan importante para la ingeniería Industrial. La Industria 4.0 propone procesos de producción en supervisión continua y constante que sea capaces de responder dinámicamente a cambios que puedan afectar a la producción en cualquier fase de la misma, en otras palabras, procesos que sean ágiles. Esta agilidad se debe a dos conceptos principales de la Industria 4.0 (Bicocchi et al. 2019), la capacidad de respuesta y la resistencia. La primera se refiere a la habilidad de adaptarse a los cambios repentinos del ambiente, ya sea la demanda, los clientes o las innovaciones tecnológicas, explotando ventajas y manteniendo su ventaja competitiva. Por otro lado, la resistencia se refiere a la capacidad de hacer frente a interrupciones o fallas a lo largo de la cadena de suministro.

A su vez, la digitalización industrial — impulsada por tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) — permite acceder a grandes volúmenes de datos en tiempo real, lo cual abre nuevas oportunidades para optimizar procesos productivos. El IoT, específicamente el IIoT (industrial Internet of Things) al abarcar los dominios de las tecnologías máquina a máquina (M2M) y de comunicación industrial, es el concepto informático que permite una interacción eficiente entre el mundo físico y su contraparte digital (Sisinni et al. 2018).

Sin embargo, el uso de los datos recabados por tecnologías de IIoT para analizar y tomar decisiones no es una tarea sencilla y directa. Éstos deben ser procesados para convertirse en información útil. De allí surge el Process Mining (PM) que combina técnicas de minería de datos y de Business Process Management (BPM), permitiendo a los responsables de la toma de decisiones descubrir modificaciones de los procesos a partir de datos, comparar comportamientos esperados y reales y enriquecer los modelos con información recuperada de los datos (Van der Aalst 2016).

Este artículo tiene como objetivo explorar el impacto de la integración entre PM e IoT en el marco de la Industria 4.0, con especial énfasis en su aplicación desde la perspectiva de la Ingeniería Industrial. A través de una revisión bibliográfica y el análisis de casos relevantes, se busca evidenciar el potencial de estas tecnologías para impulsar la eficiencia operativa y apoyar la toma de decisiones basada en datos.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Business Process Management (BPM) y Process Mining (PM)

El Business Process Management (BPM), o en español, la Gestión de Procesos de Negocio, es una disciplina o enfoque disciplinado orientado a identificar, describir, modelar, analizar, controlar, medir, mejorar y optimizar los procesos de negocio de una organización. (Dumas et al. 2018; Schenone 2011) El BPM contempla tanto procesos manuales como automatizados y no se orienta exclusivamente a un único software para su implementación. En otros términos, el BPM es una forma de gestión y mejora continua de los procesos operativos que se utilizan día a día en una organización, puesto a que consiste en reconocer las etapas de un proceso, analizarlas para identificar puntos de mejora, y luego, introducir los cambios para racionalizar el proceso y optimizarlo.

Por su parte, el Process Mining (PM), o en español, Minería de Procesos, se puede definir de la siguiente manera: la minería de procesos es una técnica basada en datos que pretende mejorar los procesos operativos mediante el uso sistemático de datos de eventos (Van der Aalst 2011; Van der Aalst 2016). Mediante la fusión de técnicas de minería de datos, machine learning (ML) y BPM, permite proporcionar información útil, identificar desviaciones del proceso y cuellos de botella, anticipar y diagnosticar problemas en el rendimiento y apoyar a la automatización.

El punto de partida para una correcta implementación del PM es un registro de eventos, o también conocido como **events log**. Cada uno de ellos se refiere a una actividad que está relacionada a un caso específico, es decir, una instancia o entidad del proceso. Los eventos de un mismo caso, están ordenados y se pueden considerar como una “ejecución” del mismo. Los registros de estos sucesos pueden almacenar información adicional sobre ellos, como el recurso que ejecuta la actividad, y, por último, se le asigna una marca de tiempo conocida como timestamp. (Van der Aalst 2011)

Existen tres tipos de PM, como muestra la Fig. 1 (Van der Aalst 2011). El primer tipo de PM es el descubrimiento (discovery), éste utiliza la información otorgada por los events log y produce un modelo sin utilizar ninguna otra información a priori, es decir, utiliza estos registros para modelizar el proceso real. El segundo tipo es el de conformidad (conformance), éste compara un modelo de proceso

existente con los registros obtenidos en el events log. Este tipo se utiliza para verificar si el modelo teórico del proceso se ajusta a la realidad y viceversa. El tercer tipo de PM es el de mejora (enhancement). En este caso, se busca mejorar el modelo de proceso existente utilizando la información brindada en el events log. A diferencia del segundo tipo, éste pretende modificar y mejorar el modelo a priori. Por ejemplo, mediante el uso de marcas de tiempo en el registro de eventos se puede ampliar el modelo para mostrar los cuellos de botella, los niveles de servicio y los tiempos de rendimiento.

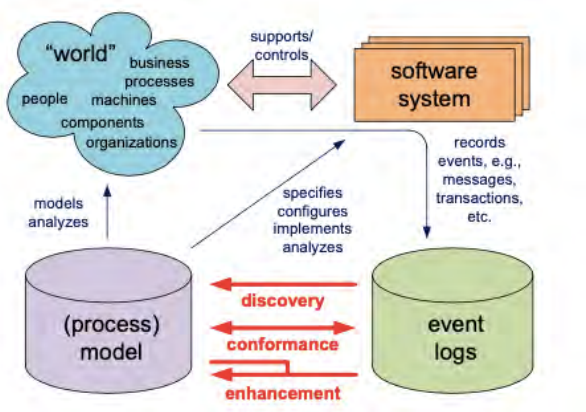



*Figura 1 Tipos básicos de Process Mining: (a) descubrimiento (discovery), (b) conformidad (conformance), (c) mejora (enhancement).*

### 2.2. Internet of Things (IoT) y Industrial Internet of Things (IIoT)

Se define en (Danino & Rouillon 2024), como Internet de las Cosas (*Internet of Things – IoT*) a la interconexión de dispositivos físicos, a través de una tecnología de comunicación, mediante sensores y software específicos. Dicha definición ofrece la posibilidad de analizar los distintos elementos que forman parte del IoT.

En primer lugar, los **dispositivos físicos**, que son las "Cosas" o elementos de uso que generan datos. Luego, las **tecnologías de comunicación**, que son necesarias puesto que proveen el medio de transmisión de los datos; si bien "Internet" es la más popular, los dispositivos conocidos como IoT también se conectan a través de *Bluetooth*, redes 4G y 5G, *transponders* satelitales o redes *ZigBee*, por mencionar algunas tecnologías. Posteriormente, los **sensores**, siendo dichos elementos los responsables de la captación de los datos del entorno; a modo de ejemplo, se pueden mencionar sensores de movimiento, de presión, de temperatura, de sonido, de luminosidad, de caída, sensores táctiles y biométricos. Y por último, un **software especifico**, tanto para su funcionamiento como para el procesamiento de los datos mediante una interfaz de usuario; ambos impactan en la vulnerabilidad de los dispositivos.

Y por su parte el IIoT (Internet de las Cosas Industriales) hace referencia a la estrecha integración de los objetos físicos propios de la industria con internet, a fin de detectar, monitorizar y controlar los procesos, promoviendo la mejora continua y optimización de los mismos. Los dispositivos partes del IIoT se pueden conectar y transferir datos entre sí en tiempo real, al monitorearlos, controlarlos y analizarlos permiten reducir los costos de los procesos, amantar su productividad y mejorar la toma de decisiones en las organizaciones (Danino & Rouillon 2024). Además, para nombrar algunos de los usos más significativos podemos encontrar, por ejemplo, la gestión remota y conexión digital, supervisión autónoma, o también llamada Procesamiento en el Dispositivo (P2D), el mantenimiento preventivo y predictivo, la logística de transporte y gestión de inventario, el control de calidad, entre otros.

## 3. INTEGRACIÓN DE IOT Y PM

Como ya se ha mencionado anteriormente, el uso de los datos recabados por tecnologías de IoT o IIoT para analizar y tomar decisiones no constituye una tarea sencilla ni directa, debido a que estos deben ser procesados para convertirse en información útil.

El Manifiesto IoT-Meets-BPM (Janiesch et al. 2020) propone cómo la gestión de procesos empresariales (BPM) y el IoT pueden beneficiarse mutuamente y combinarse de forma eficaz (véase

la Fig. 2). Por un lado, el IoT proporciona una gran cantidad de datos (por ejemplo, procedentes de sensores) que pueden complementar los datos ya disponibles (por ejemplo, las trazas producidas por los procesos) utilizados en BPM. Una clara ventaja del uso de datos IoT es que pueden recuperarse automáticamente de los dispositivos, a diferencia de los procedimientos tradicionales para recopilarlos, que pueden requerir que usuarios humanos inicien y finalicen manualmente las actividades. Además, los datos IoT son menos propensos a contener errores y, por tanto, más precisos que los generados por humanos. En este caso, el BPM puede servir de puente entre los datos brutos de los sensores y las actividades reales del proceso subyacente, que sería la implementación de algunos de los tipos de PM.

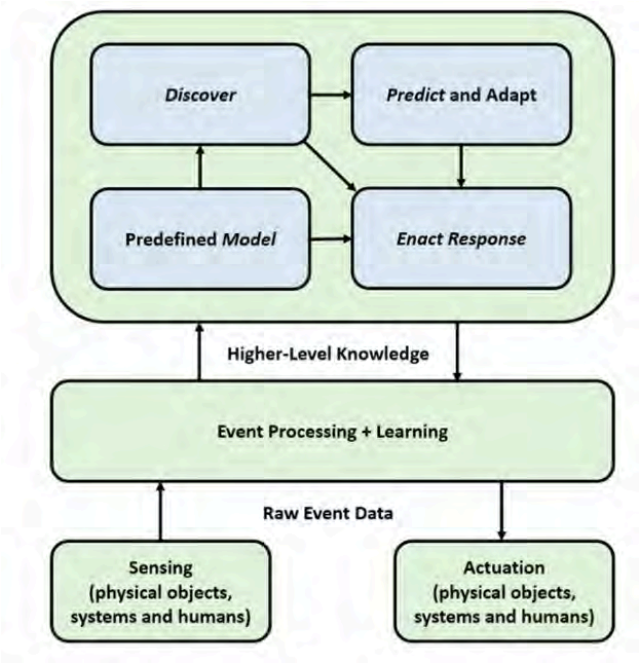



*Figura 2 Interacción entre IoT y BPM (Janiesch et al. 2020).*

Asimismo, el IoT puede complementar al BPM y al PM con datos continuos mediante sensores de detección y actuación física para mejorar la toma de decisiones (Janiesch et al. 2020). Las mismas en los procesos no solo necesitan datos de los repositorios tradicionales (como, las bases de datos y almacenes de datos) que proporcionan datos históricos, sino también datos actualizados. Los datos provenientes de IoT, como los registros de eventos, agregan valor y utilidad para la toma de decisiones. Por ende, el IoT podría reducir la necesidad de señalar manualmente la ocurrencia de eventos y obtener esta información a partir de los sensores disponibles, lo que permite obtener datos aún más precisos, reducir los errores y aumentar la eficiencia.

## 4. SINERGIA ENTRE PM Y LA INGENIERÍA INDUSTRIAL

Para los profesionales de la Ingeniería Industrial, la digitalización trae consigo infinitas posibilidades para que puedan evolucionar de su rol tradicional. En este artículo, se trató la herramienta de Process Mining, que potenciada por el IoT, permite acceder a datos detallados y dinámicos sobre el comportamiento real de los procesos, ya sean, productivos, administrativos y/o logísticos, habilitando intervenciones más precisas.

Tradicionalmente, los ingenieros industriales han basado sus decisiones en observaciones directas, entrevistas con operarios, y análisis estáticos de datos históricos. Si bien estas metodologías siguen siendo valiosas, presentan limitaciones frente a entornos dinámicos y altamente automatizados.

Como ya se mencionó anteriormente, el PM introduce una representación precisa y automatizada de los procesos reales a partir de los datos registrados en los sistemas digitales de la organización (ERP, MES, CRM, entre otros) o, inclusive, en dispositivos de IoT. Esta capacidad permite a los ingenieros industriales identificar en tiempo real cuellos de botella, tareas redundantes, desvíos de procesos, y puntos críticos de variabilidad. En consecuencia, la toma de decisiones deja de basarse únicamente en

la intuición o en modelos teóricos, para apoyarse en evidencia empírica, aumentando significativamente la efectividad de las acciones correctivas o preventivas.

Asimismo, esta tecnología potencia los principios de mejora continua propios de enfoques como Lean Manufacturing y Six Sigma, al permitir una retroalimentación constante basada en datos. Los ciclos PDCA (Plan-Do-Check-Act) se vuelven más ágiles y precisos, ya que los ingenieros pueden monitorear los resultados de las mejoras implementadas casi en tiempo real, y ajustar rápidamente sus estrategias. De este modo, el PM no solo optimiza los procesos actuales, sino que también habilita un entorno de aprendizaje organizacional y adaptación constante, esencial para mantener la competitividad en contextos de rápida evolución tecnológica y alta presión operativa.

La incorporación del PM dentro del arsenal de herramientas de la Ingeniería industrial no solo amplia el alcance de acción del profesional y capacidad técnica, sino que consolidan su rol como agentes claves en la transformación digital de las organizaciones.

## 5. CONCLUSIONES

La integración entre PM e IoT en el contexto de la Industria 4.0 representa una poderosa herramienta capaz de transformar la manera en la que las organizaciones gestionan y optimizan sus procesos. En este trabajo se ha demostrado que dicha combinación no solo permite una visualización precisa de los procesos reales mediante datos empíricos o de registros de eventos, sino que también habilita una ágil, fundamentada y estratégica toma de decisiones.

Desde la Ingeniería Industrial, esta convergencia de tecnologías permite trascender los enfoques tradicionales basados en análisis de datos históricos y observaciones puntuales, dando un salto a metodologías automatizadas, en tiempo real y con alta capacidad de adaptación. El PM, nutrido de los datos generados por los dispositivos de IoT, se convierte en un instrumento clave para identificar cuellos de botellas, evaluar desviaciones, anticipar fallos y fomentar una cultura de mejora continua.

Por ende, estando inmersos en un entorno cada vez más digital, dinámico y competitivo, la aplicación conjunta de PM e IoT fortalece la eficiencia operativa. Incluso redefine el rol del Ingeniero Industrial como un actor fundamental en la transformación digital de las organizaciones. En este artículo pone en evidencia que el futuro de la Ingeniería Industrial estará cada vez más orientado al aprovechamiento de datos, la automatización inteligente y la capacidad de adaptación, siendo la integración del PM e IoT un camino estructurado, estratégico y eficaz para alcanzar dichos objetivos.

## 6. REFERENCIAS.


[1] Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Securing the future of German manufacturing industry. Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion.

[2] Bicocchi, N., Cabri, G., Mandreoli, F., & Mecella, M. (2019). Dynamic digital factories for agile supply chains: An architectural approach. *Journal of Industrial Information Integration, 15*, 111–121.

[3] Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry, 101*, 1–12.

[4] Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (2018). Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14*(11), 4724–4734.

[5] Van der Aalst, W. M. P. (2016). Process mining: Data science in action (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49851-4

[6] Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J., & Reijers, H. A. (2018). *Fundamentals of business process management* (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56509-4

[7] Schenone, D. S. (2011). Introducción a Business Process Management (BPM). Technical library, IBM developer Works.

[8] Van der Aalst, W. M. P. (2011). Process mining: Discovery, conformance and enhancement of business processes. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19345-3

[9] Van der Aalst, W. (2012). Process mining: Overview and opportunities. *ACM Transactions on Management Information Systems, 3*(2), 7:1–7:17. https://doi.org/10.1145/2229156.2229157

[10] Danino, C. I., & Rouillon, E. J. (2024). El internet de las cosas y su vinculación con la ingeniería industrial. *AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN), AJEA 30*. https://doi.org/10.33414/ajea.1316.2023

[11] McFarlane, D. (2018, octubre). *Industrial Internet of Things: Applying IoT in the Industrial Context*. Connected Everything. https://connectedeverything.ac.uk/industrial-internet-of-things/

[12] Janiesch, C., Koschmider, A., Mecella, M., Weber, B., Burattin, A., Di Ciccio, C., Fortino, G., Gal, A., Kannengiesser, U., Leotta, F., Mannhardt, F., Marrella, A., Mendling, J., Oberweis, A., Reichert, M., Rinderle-Ma, S., Serral, E., Song, W., Su, J., & Zhang, L. (2020). The internet of things meets business process management: A manifesto. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine, 6*(4), 34–44. https://doi.org/10.1109/MSMC.2020.3003135

# APLICACIÓN DE UNA GENERALIZACIÓN DEL TEOREMA DE INTEGRACIÓN RELATIVISTA DE VELOCIDADES PARA EL CÁLCULO MATEMÁTICO DE LAS INCAPACIDADES POR LESIONES CORPORALES A SERIES NUMÉRICAS ALEATORIAS

Vázquez, Eduardo Daniel

*Médico*
*Doctorado en Medicina y Cirugía (UBA) - Docente Autorizado (UBA)*
*Alumno de grado en Abogacía*
*Facultad de Derecho*
*- Universidad Nacional de Lomas de Zamora -*
*Alumno de grado en Ingeniería Mecatrónica*
*Instituto de Investigaciones de Tecnología y Educación (IITE)*
*Centro Asociado a la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CIC)*
*Facultad de Ingeniería*
*- Universidad Nacional de Lomas de Zamora -*

**RESUMEN**

El objetivo fue desarrollar una formulación más general del teorema de integración relativista de las velocidades, con la intención de condensar en una única ecuación matemática la integración de más de dos parámetros, evitando el enfoque iterativo del teorema convencional.

Las modificaciones introducidas al algoritmo einsteniano se basaron en una redefinición del límite superior, que en la versión original es la velocidad de la luz en el vacío, y en el procedimiento para determinar el coeficiente del denominador, lo que permitió integrar múltiples parámetros sin comprometer la coherencia de los resultados.

Los hallazgos proporcionaron una ecuación precisa y aplicable al cálculo matemático de incapacidades en disciplinas como la medicina, el derecho, la seguridad social y el sector asegurador que, en el presente trabajo fue probado con series numéricas aleatorias, devolviendo resultados consistentes con una correlación positiva con el grado de daño corporal que simulan las series utilizadas. Esto muestra la fiabilidad, la coherencia interna y la consistencia de los resultados obtenidos con su uso, que lo tornan en un sistema de cálculo de incapacidades que supera la arbitrariedad de los mecanismos barémicos utilizados hasta el presente, reemplazándolos con creces por su objetividad matemática.

**Palabras Claves:** Matemática; Relatividad; Seguro; Incapacidad.

***ABSTRACT***

*The objective was to develop a more general formulation of the relativistic integration theorem of velocities, intending to condense the integration of more than two parameters into a single mathematical equation, avoiding the iterative approach of the conventional theorem.*

*The modifications introduced to Einstein's algorithm were based on a redefinition of the upper limit, which in the original version is the speed of light in vacuum, and on the procedure for determining the denominator coefficient, allowing the integration of multiple parameters without compromising the consistency of results.*

*The findings provided a precise equation applicable to the mathematical calculation of disabilities in disciplines such as medicine, law, social security and insurance which, in this work, was tested with random numerical series, returning results consistent with a positive correlation with the degree of bodily harm simulated by the series used. This shows the reliability, internal consistency and consistency of the results obtained with its use, which make it a system for calculating disability that goes beyond the arbitrariness of the baremic mechanisms used to date, by replacing them with mathematical objectivity.*

***Keywords:*** *mathematic; relativity; insurance; disability.*

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Estado del arte

En la actividad pericial médica se debe recurrir frecuentemente al uso de tablas, denominadas baremos, en honor a su creador, el francés François-Bertrand Barrême (Tarascón, Arlés, 07 de Julio de 1638 - París 1703), matemático francés, considerado uno de los fundadores de la contabilidad moderna, autor de numerosos libros, entre ellos*: Les Comptes faits, ou Le Tarif général de toutes les monnoyes* (1669); *Le Livre nécessaire pour les comptables, avocats, notaires, procureurs, négociants, et généralement à toute sorte de conditions* (1671); *Le Grand Banquier, ou le Livre des monnoyes étrangères réduites en monnoyes* de France (1696) y *Le Livre facile pour apprendre l'arithmétique de soy-même & sans maître* (1698), quien elaboró en forma tabulada, una serie de equivalencias monetarias y entre distintos sistemas de pesos y medidas ; fue tal su éxito, que su apellido quedó inmortalizado en la denominación de estos tipos de tablas.

Actualmente, en el ámbito referido más arriba, se utilizan tales baremos para la estimación de las incapacidades físicas y, en algunos casos, psíquicas; sin embargo, en la experiencia profesional del autor, estos baremos adolecen de un problema insalvable: desde el momento en que están confeccionados según el criterio individual y el libre arbitrio de su o sus autores, están viciados de arbitrariedad (Vázquez, 2009) (Defilippis Novoa & Sagastume, 1987) (Borobia Fernández, Borobia, Aguado Benedí, & Alías Martín, Valoración del daño corporal, 2006); de hecho, algunos baremos son tan arbitrarios, que llegan a estimar, para una misma lesión, como una fractura de fémur, entre 10% y 60% de la denominada “Incapacidad Laboral Total” o “Total Obrera”, habitualmente expresada con las siglas “ILT” y “TO”, respectivamente, que constituye el cien por ciento de la capacidad laborativa de la persona humana y que es el estándar de referencia para la determinación de las incapacidades.

Es decir, que una persona con plena capacidad laboral goza del cien por ciento de tal condición y, *contrario sensu*, la ausencia total de capacidad de desempeño laboral, lo constituye el 100% de incapacidad laborativa.

Uno de los problemas que motivaron esta investigación, es que, cuando existen varias incapacidades en una persona lesionada —por ejemplo, el caso de un sujeto con múltiples fracturas, una en el fémur derecho, otra en el húmero izquierdo y otras más en el cúbito y radio derechos—, la suma directa de tales valores porcentuales individuales de incapacidad resultaría en la paradójica situación de que alguien podría llegar a acumular un ciento cincuenta por ciento de incapacidad, absurda situación equiparable al morirse esa persona una vez y media.

Esto ha llevado a algunos intentos matemáticos de resolución de este extravagante resultado posible, como, por ejemplo, la sumatoria de las capacidades restantes, en la que se sustrae la primera estimada del cien por ciento total y las restantes se calculan como porcentaje de lo que resta de cada sustracción, según la (Ecuación 1), que es utilizada para calcular incapacidades simultáneas polifuncionales, es decir, que abarcan más de un sistema u órgano o segmento corporal o la desarrollada por Victor Balthazard (Paris, 17 de enero de 1872 – Ciboure, 24 de diciembre de 1950), médico francés, dedicado a la Medicina Legal quien presentó una fórmula de cálculo para incapacidades no ya simultáneas, sino sucesivas, pero monofuncionales, es decir, que afectaban a un solo órgano, miembro o función corporal.

Pero ambas fórmulas, terminan siempre por ser aplicadas a incapacidades que están estimadas arbitrariamente, según algún o algunos de los baremos existentes, por lo que, en definitiva, arrastran el sesgo inicial que las vicia de parcialidad y arbitrariedad, tornándolas carentes de la necesaria objetividad y rigor científico, Asunto ya criticado desde hace tiempo por diversos autores (Borobia Fernández, Borobia, Aguado Benedí, & Alías Martín, Valoración del daño corporal, 2006) (Defilippis Novoa & Sagastume, 1987) (Vázquez, 2009).

De hecho, esto ha llevado a una inusitada pululación de distintos baremos, tanto a nivel internacional (Rothley, 2003), como en nuestro país, donde, para un mapa político de veinticuatro provincias, existen unos veinticinco baremos distintos, desde los oficiales, como el baremo de la Dirección de Reconocimientos Médicos de la Provincia de Buenos Aires, o el del decreto 659/96, anexo de la ley 24557 de Riesgos del Trabajo; hasta los de autores médicos de reconocido prestigio, como el de Defilippis-Novoa y Sagastume (Defilippis Novoa & Sagastume, 1987) o el de Ramos Vértiz (Ramos Vértiz, Ceballos, & Ramos Vértiz, 1984), o el de Schächter (Schächter, Holm, & Pueyrredón, 2007).

### 1.2. Antecedentes científico-matemáticos

En una primera y previa revisión bibliográfica, hemos encontrado fundamento suficiente para nuestra investigación en ciertos modelos matemáticos provenientes de la física relativista.

Particularmente, las transformaciones de Lorentz (Torregrosa Lillo, 2002), quien, basándose en la descripción de FitzGerald de una contracción espacial, propone las fórmulas que la describen, ya que este efecto permitía dar cuenta de la nulidad de variación en las difracciones de la luz en el experimento de Michelson-Morley; según esta explicación, y basándose en efectos mensurables en los electrones acelerados, los objetos materiales que están compuestos por partículas sufren, por la acción del movimiento, una contracción de sus dimensiones físicas en el sentido de su movimiento.

De acuerdo con la teoría matemática propuesta por Lorentz (Torregrosa Lillo, 2002), la contracción de las longitudes se expresa según la fórmula (Ecuación 1):

$$L_1 = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \tag{1}$$

donde L1 es la longitud del cuerpo en movimiento, L0 la longitud medida en reposo, que se multiplica por el denominado “factor de Lorentz” (Ecuación 2) (Annamalai, 2023), que relaciona el cuadrado de la velocidad del objeto medido con el cuadrado de la velocidad de la luz, y que se expresa de la siguiente manera:

$$\gamma \equiv \frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{2}$$

donde la diferencia de tiempo en el sistema en reposo, sobre la diferencia de tiempo propio –entendiéndose por tiempo propio (Ling, Sanny, & Moebs, 2021) (González Martínez, Relatividad especial, 2007) el correspondiente a un sistema inercial dado–, es igual a la unidad (es decir el tiempo medido en el primer sistema de referencia en reposo), sobre el coeficiente de relación ya expresado; la elegancia matemática de esta fórmula es notoria, en la relación que hace de las velocidades físicas con respecto a la de la luz, dejando ya planteada la sugestiva idea acerca de la imposibilidad de los entes físicos de superar dicha velocidad.

Si consideramos la variación de esa distancia solamente en el eje x del universo de tres dimensiones espaciales más una temporal, entonces estaremos expresando la velocidad del movimiento rectilíneo uniforme según la (Ecuación 3):

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{3}$$

que, aplicada a la suma no relativista de velocidades, es decir a los sistemas galileanos de la mecánica clásica darían por resultado (Ecuación 4):

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\Delta x'}{\Delta t'} \tag{4}$$

lo que puede simplificarse como la ya expresada (Ecuación 5):

$$v = u + u' \tag{5}$$

es decir, la velocidad final “V” es igual a la suma de la velocidad del sistema de referencia *v* más la velocidad de $u'$; o, dicho de otro modo, la suma de la velocidad medida de esta hipotética partícula, más la del sistema de referencia sobre el que se desplaza, medidos desde el otro sistema inercial.

Pero, para seguir conservando las invariancias que postula la relatividad restringida, las velocidades deben calcularse mediante la utilización de las transformaciones de Lorentz, con lo cual tendremos que (Ecuación 6):

$$v = \frac{\Delta x + \Delta x' u}{\Delta t + \frac{\Delta t' u}{c^2}} \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \tag{6}$$

y que (Ecuación 7):

$$\Delta x = \frac{\Delta x' + u \Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \tag{7}$$

entonces (Ecuación 8), de (Ecuación 4) y (Ecuación 6) y (Ecuación 7):

$$\Delta v + \Delta u = \frac{\Delta u + \frac{\Delta v}{\gamma(\Delta u)^2}}{1 + \frac{\Delta u \cdot \Delta v}{c^2}} \qquad (8)$$

que, simplificando, nos da (Ecuación 9):

$$v = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}} \qquad (9)$$

que no es más que la conocida fórmula de integración relativista de las velocidades o teorema de la integración relativista de velocidades.

Entendemos, por nuestra parte, que esta integración relativista de las velocidades puede recibir ciertas modificaciones estructurales matemáticas que, respetando su coherencia interna, permitan no ya la integración de dos parámetros, sino la de la cantidad de parámetros que resulten necesarios para determinar matemáticamente una incapacidad.

Así, tal como, según esta fórmula einsteniana, solo podemos sumar dos velocidades, pero, con las adecuadas modificaciones de ciertos componentes de dicha fórmula, sostenemos que será posible realizar la suma integrada de la cantidad de mediciones corporales necesarias para determinar matemáticamente una incapacidad física.

Es decir, así como en el algoritmo relativista, solo podemos sumar dos velocidades, en la modificación que nos proponemos realizar de esta fórmula, se podrán sumar más de dos cifras resultantes de más de una medición, por ejemplo, para determinar la incapacidad que afecte al codo de una persona, mediremos el valor angular de la flexión de dicha articulación, su de extensión, como así también de otros dos movimientos, la supinación y la pronación.

Pero, para el caso del hombro de un lesionado, entonces deberemos medir no ya cuatro valores de movilidad, sino seis, a saber: la flexión, la extensión, la abducción, la aducción, la rotación externa y la rotación interna.

El algoritmo propuesto deberá, entonces, contemplar esta posibilidad de ampliar, o disminuir, la cantidad de medidas efectuadas, necesarias para la correcta, objetiva y científica medición de las incapacidades de una manera matemáticamente exacta, para cada región corporal dañada, debiendo admitir no solo valores angulares de movilidad, sino mediciones de longitud de los miembros y otros valores de medición, como los surgidos de exámenes complementarios de laboratorio o de prácticas médicas diagnósticas que se traduzcan en parámetros numéricos objetivamente obtenidos.

## 2. **MATERIALES** Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

Se utilizó un computador portátil Hewlett-Packard®, con procesador i-7® y Memoria de Acceso Aleatorio (RAM) de 12 MB, corriendo el programa de hojas de cálculo Microsoft® Excel®, el procesador de texto Microsoft® Word®, el sistema de gráficos de la hoja de cálculo Quattro Pro® y Corel Chart®, ambos de Corel Corporation®, este último, un programa de 16 bytes, corriendo en el emulador, también denominado “máquina virtual”, VirtualBox®, de Oracle Corporation®.

### 2.2. Métodos

Se procedió a operar una transformación los resultados de mediciones de diversos movimientos articulares, indicados en grados sexagesimales y de mediciones de longitud de distintos segmentos corporales, vertidos en milímetros, para utilizarlos como magnitudes adimensionales.

Partiendo, entonces, del teorema a generalizar (Ecuación 9):

$$v_{\square\square\square\square\square} = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}} \qquad (9)$$

Se modificó el numerador del teorema de integración relativista de velocidades, para incorporarle como sumandos, dos o más de dos resultados de mediciones, hasta el número *n*, según resultara necesario para cada caso.

Consecuentemente, se incorporaron la misma cantidad de multiplicandos en el factor de Lorentz del denominador de la fórmula de Einstein.

Por otro lado, se contempló la siguiente relación: si para *n* igual a dos mediciones, el coeficiente del factor de Lorentz es igual a uno, entonces esto puede expresarse como que dicho coeficiente es igual a *n – 1*, de tal forma que:

Se reemplazó la constante *c*, el valor de la velocidad límite de Lorentz, que hasta el momento actual coincide con la velocidad de la luz en el vacío, del factor de Lorentz, por el máximo del "Valor Vida" ya explicado, cuya expresión porcentual de 100, siendo ya adimensional, no requiere de más pasos que la eliminación de dicho signo, utilizando la expresión numeraria pura.

De acuerdo con estos mismos criterios, si la constante, para dos valores, debe ser elevada al cuadrado, o a la segunda potencia, se consideró que, siendo para n valores de medición, el exponente será n, o la enésima potencia, resultando así la fórmula matemática propuesta (Ecuación 10).

$$I_{final} = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + \cdots m_n}{(n-1) + \frac{m_1 \times m_2 \times m_3 \times \ldots m_n}{I_{máx}}} \qquad (10)$$

Donde:

$I_{final}$: Incapacidad final.

*m*: cada uno de los valores des dimensionados de las mediciones corporales efectuadas.

*n*: número total de mediciones efectuadas.

$I_{máx}$: Incapacidad máxima (100%) o "Valor Vida", expresado, sin más signos, como 100.

Por otra parte, se generaron series aleatorias de valores posibles de pérdidas funcionales de movilidad articular, en rangos numéricos de enteros, dentro de los arcos de movilidad de cada movimiento de cualquier posible articulación del aparato locomotor del cuerpo humano.

Estas series numéricas se realizaron mediante la función de aleatorización del programa de hojas de cálculo, denominada: =ALEATORIO.ENTRE(0;100), donde los valores entre paréntesis, separados por el punto y coma, son los mínimos y máximos de incapacidad posibles en una escala porcentual, correspondiente a la utilizada como estándar en Medicina Legal.

Por otro lado, para facilitar la legibilidad, todos los resultados se redondearon a dos decimales, utilizando la función de hoja de cálculo denominada =REDONDEAR(), incluyendo entre los paréntesis el número dos, correspondiente a la cantidad de posiciones decimales considerada.

Así, se generaron en sendas hojas de un mismo libro de cálculo, sendas matrices de 4, 5 y 6 columnas por 234 filas, siendo el número de columnas correspondiente con los grados de libertad de movimiento mínimos y máximos de las articulaciones humanas y el número de filas el correspondiente a la aplicación del resultado de dicha función del programa de hojas de cálculo utilizado, pero definiendo un rango de entre 1 y 1000, con la consideración previa de que cualquier número superior a 100 que apareciera primero, sería el de elección para determinar el número de filas de todas las matrices mencionadas.

Seguidamente, se copiaron las matrices resultantes, una a una, al portapapeles y, para fijar los resultados obtenidos de la función de hoja de cálculo mencionada, se pegaron no como las funciones originales, sino como sus resultados numéricos obtenidos de la primera aplicación de tal función de aleatorización.

Posteriormente, se aplicó a cada línea de cada matriz, en la primera columna libre de la hoja de cálculo a la derecha de la última columna de cada matriz, la función =PROMEDIO(n;m), donde n corresponde al primer número obtenido de la primera celda de cada fila, el punto y coma indica que se tomó todo el rango de celdas entre n y m, que corresponde, esta última, al valor obtenido para la última celda de cada fila.

A posteriori, se aplicó, en la misma forma y con los mismos criterios que la función de media aritmética descripta anteriormente, en la siguiente columna libre a la derecha de la anterior, la ecuación de generalización del teorema de integración relativista de velocidades, ajustada a la cantidad de valores a integrar de cada fila de cada matriz, es decir, para [n, m] de cada fila de cada matriz aleatorizada.

Con dichos resultados, por último, se construyeron, mediante herramientas de graficación de distintos programas de hoja de cálculo, los gráficos que se muestran en la sección siguiente.

Además, observando una característica del teorema original, consistente en que no admite para la integración cifras superiores a las de la velocidad límite de Lorentz, ya que, en ese caso, el resultado siempre es dicho límite, se decidió someter a la ecuación generalizada propuesta a la integración de valores supra máximos, es decir valores absolutos adimensionales superiores a 100 —o sea, al 100% de incapacidad total, nuestro "límite de Lorentz" a los fines del cálculo de incapacidades—, bajo la hipótesis de que esta fórmula generalizada "soportaría" la integración de tal tipo de valores supra máximos, sin alcanzar dicho límite, a no ser que la integración de varias de las mediciones, tuviera ese resultado.

Esto reviste una importancia capital, ya que en la evaluación de incapacidades, la medición de algunos parámetros, como, por ejemplo, la abducción del hombro (que es la separación del miembro superior hacia su lado de la línea media corporal) puede tener valores de hasta 180º sexagesimales, o la flexión máxima de la rodilla, que puede alcanzar los 135º sexagesimales.

Así, se repitieron los procedimientos arriba detallados, pero esta vez para un número de ensayos de 1000 casos, y, para remedar las condiciones de medición de, por ejemplo, más de una articulación, se utilizaron entre 3 y 10 variables a integrar, de tal modo de forzar al máximo y reproducir las condiciones de exigencia más extremas que pueden darse en la práctica médico legal; resultando así sendas matrices de entre 3 y 10 columnas, por 1000 filas.

## 3. RESULTADOS

Se obtuvo así la ecuación ya descripta más arriba (Ecuación 10):

$$\text{[illegible]} = \frac{\text{[illegible]}}{(\text{[illegible]} - 1) + \frac{\text{[illegible]}}{\text{[illegible]}}} \tag{10}$$

Que, reformulándola con una notación vectorial, resulta (Ecuación 11):

$$\text{[illegible]} = \frac{\sum \text{[illegible]}}{(\text{[illegible]} - 1) + \frac{\prod \text{[illegible]}}{\text{[illegible]}}} \tag{11}$$

Y, en una notación matricial, nos da (Ecuación 12):

$$\text{[illegible]} = \frac{\sum_{\text{[illegible]}}^{\text{[illegible]}} \text{[illegible]}}{(\text{[illegible]} - 1) + \frac{\prod_{\text{[illegible]}}^{\text{[illegible]}} \text{[illegible]}}{\text{[illegible]}}} \tag{12}$$

donde *M*: matriz unidimensional (o vector) que almacena *n* elementos, constituidos por las *n* magnitudes adimensionales de las *n* mediciones efectuadas.

De la aplicación práctica de la fórmula propuesta en el presente trabajo, se obtuvo una serie de valores numéricos que mantuvieron una correspondencia lineal positiva con los propios valores y con los promedios de las matrices de datos numéricos aleatorios generadas para el presente estudio (Figura 1, Figura 2 y Figura 3).

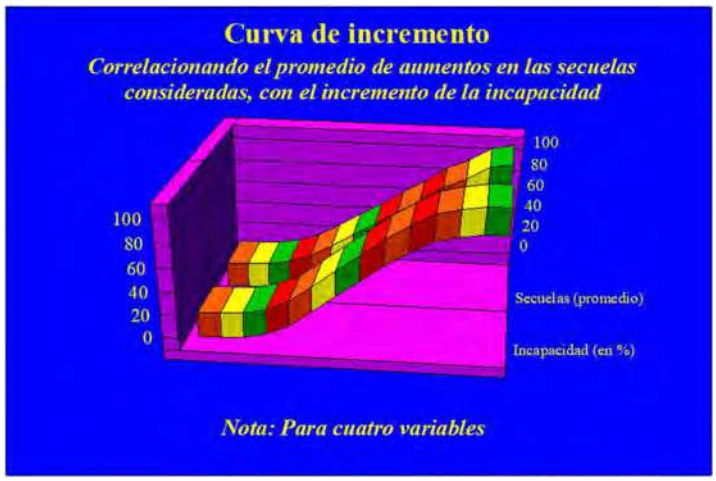



***Figura 1:*** *Curva de incremento de los resultados obtenidos para cuatro variables a integrar, comparados con el incremento de los valores aleatorios de incapacidad.*

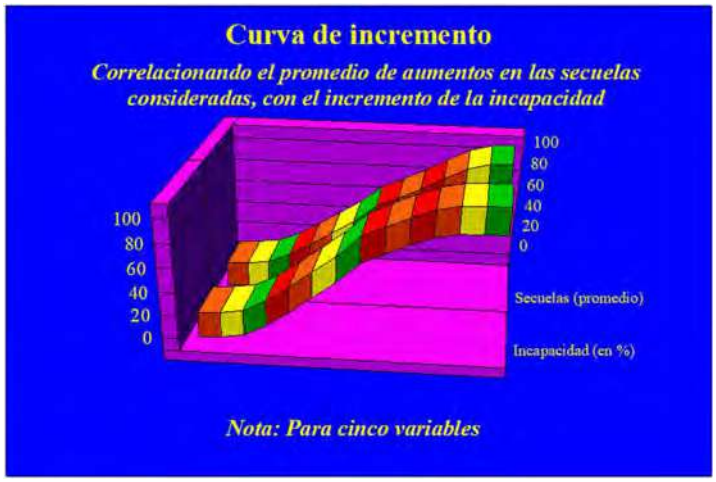



***Figura 2:*** *Curva de incremento de los resultados obtenidos para cinco variables a integrar, comparados con el incremento de los valores aleatorios de incapacidad.*

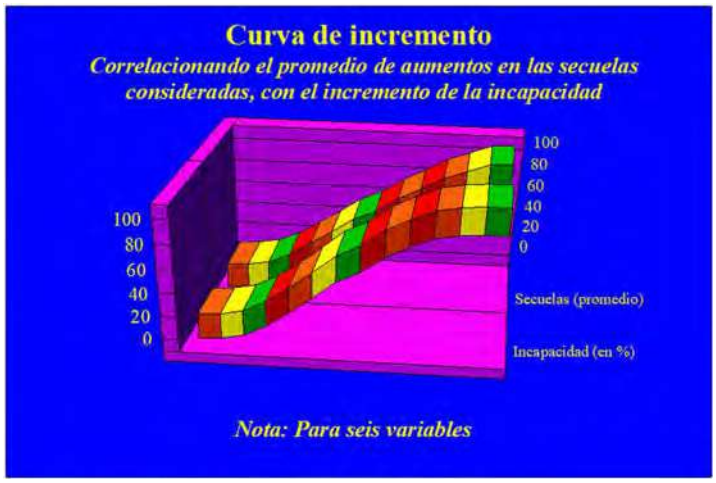



***Figura 3:*** *Curva de incremento de los resultados obtenidos para seis variables a integrar, comparados con el incremento de los valores aleatorios de incapacidad.*

Además, la ecuación propuesta devino tolerante a la incorporación de valores supra máximos sin alcanzar el límite superior del 100% de incapacidad, salvo en las combinaciones de datos en que así era esperable (Tabla 1).

***Tabla 1:*** *Resultados de la integración de valores numéricos usando la fórmula propuesta, en una serie extractada — por razones de espacio— de una de las matrices originales. En cursiva, los valores que alcanzan el límite máximo de la ecuación, en negrita, los valores que los superan (valores supra máximos) en negrita cursiva, los resultados obtenidos. La suma directa se incluye como referencia de la correlación positiva de los resultados obtenidos*

| ***Series numéricas*** | | | | | | | | | | ***Resultados*** | ***Suma directa*** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 90 | 23 | 85 | 29 | 9 | 24 | 3 | 10 | 51 | 25 | ***38.78*** | 349 |
| 59 | 59 | 98 | 22 | 21 | 89 | 31 | 43 | 46 | 22 | ***54.44*** | 490 |
| 3 | **128** | 90 | 12 | 88 | 78 | 8 | 19 | 35 | 91 | ***61.33*** | 552 |
| 65 | 12 | 23 | **130** | **140** | 10 | 38 | 42 | *100* | **110** | ***74.44*** | 670 |
| **152** | 49 | **109** | 42 | 52 | 23 | 71 | 91 | 62 | 92 | ***82.43*** | 743 |
| 96 | 94 | **101** | *100* | **110** | *100* | 2 | 94 | 98 | 95 | ***98.70*** | 890 |
| 28 | 28 | 3 | 15 | **320** | 65 | 65 | 33 | **316** | 16 | ***98.78*** | 889 |
| **183** | 85 | **121** | *100* | 21 | 1 | **105** | **147** | 68 | 61 | ***99.08*** | 892 |
| 34 | **150** | 34 | 2 | 5 | **160** | 17 | **200** | **225** | 71 | ***99.78*** | 898 |
| **121** | 13 | **423** | 35 | 67 | 18 | 37 | 90 | 57 | 38 | ***99.87*** | 899 |
| **121** | *100* | *100* | *100* | *100* | *100* | *100* | *100* | *100* | *100* | ***100.00*** | 1021 |
| *100* | *100* | *100* | *100* | *142* | *100* | *100* | *100* | *100* | *100* | ***100.00*** | 1042 |
| *100* | *100* | *100* | *100* | *100* | *100* | *100* | *278* | *100* | *100* | ***100.00*** | 1178 |

## 4. DISCUSIÓN

Con esta metodología se obtuvo una ecuación de cálculo que reúne, a nuestro entender, las siguientes características:

**Adecuación al objeto:** La generalización propuesta del teorema de integración relativista de velocidades resulta adecuada al objeto de estudio, ya que su comportamiento matemático muestra una absoluta correlatividad positiva con el grado de lesión corporal y con las necesidades del cálculo de incapacidades.

**Coherencia matemática interna:** La fórmula propuesta mantiene la característica de coherencia interna del original einsteniano, no necesitando recurrir a ningún elemento ajeno a los valores a integrar, aún en la modificación del factor de Lorentz.

**Consistencia de resultados:** La correlación positiva entre las cifras de simulación de daños corporales y los resultados obtenidos con nuestra ecuación, revelan que se trata de un mecanismo consistente con los postulados de objetividad que se requiere en la valoración de incapacidades físicas por lesiones corporales.

**Objetividad:** Frente al carácter arbitrario de las cuantificaciones de los distintos baremos, la ecuación generalizada propuesta muestra resultados objetivos, fruto de operaciones matemáticas y no del criterio del observador.

### 4.1. Conclusión

Como corolario de esta investigación, es posible afirmar que nuestra generalización propuesta del teorema de integración relativista de velocidades resulta en una más objetiva y fiable herramienta para el cálculo matemático de las incapacidades físicas por lesiones corporales, superando con

creces a la tradicional arbitrariedad de que adolece el sistema de estimación de incapacidades mediante baremos.

## 5. RECONOCIMIENTOS

Al Lic. Fernando Pedro Blanco, Profesor Titular de la Cátedra de Relatividad, Universidad CAECE, por sus valiosos aportes a la correcta redacción matemáti-ca, sus agudas observaciones y su gentil predisposición a sugerir mejoras en la expresión de terminologías específicas.

## 6. REFERENCIAS

1. Annamalai, C. (2023). Lorentz Factor and Time Dilation on the Special Theory of Relativity. IEEE Xpert. doi:https://doi.org/10.36227/techrxiv.24297325.v1
2. Borobia Fernández, C., Borobia, C., Aguado Benedí, M. J., & Alías Martín, P. (2006). Valoración del daño corporal. Barcelona: Elsevier Masson.
3. Defilippis Novoa, E. C., & Sagastume, J. M. (1987). Tratado de traumatología médico legal (2ª Ed. ed.). Buenos Aires: Ábaco.
4. González Martínez, J. F. (2007). Relatividad especial. Recuperado el 24 de junio de 2008, de 3.3.- La transformación de Lorentz: http://www.geocities.com/relatividad_2000/web/especial/LatrLor.html
5. Ling, S. J., Sanny, J., & Moebs, W. (2021). Física Universitaria (Vol. 3). Houston: OpenStax - Rice University. Obtenido de https://assets.openstax.org/oscms-prodcms/media/documents/FisicaUniversitariaVolumen3WEB_UGpB6A5.pdf
6. Ramos Vértiz, J. R., Ceballos, E. M., & Ramos Vértiz, A. J. (1984). Traumatología y Ortopedia. Buenos Aires: Ergon.
7. Rothley, W. (2003). Proyecto de informe. Recomendaciones destinadas a la Comisión sobre una Guía baremo europea, Parlamento Europeo, Comisión de Asuntos Jurídicos y Mercado Interior.
8. Schächter, S., Holm, M., & Pueyrredón, J. H. (2007). Guia para la Evaluación de las Incapacidades Médicas del Aparato Locomotor. Buenos Aires: Asociación Argentina de Ortopedia y Traumatología.
9. Torregrosa Lillo, Á. (2002). Relatividad fácil: introducción a la teoría de la relatividad, la cosmología y los agujeros negros (1ª Ed. ed.). Alicante: Ediatorial Club Universitario.
10. Vázquez, E. D. (2009). El Cálculo Matemático de las Incapacidades. Buenos Aires: El Derecho.



# Eje 3
# Desarrollos Tecnológicos Industriales

# ANÁLISIS DE LA ESCALABILIDAD DE FIBRATEXTIL ANIMAL A FIBRAS VEGETALES Y SINTÉTICAS

Abet, Jorge; Carrizo, Blanca; Enamorado, Sofía; Arcidiácono, Marcelo

*GICAPP, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional*
*Bcarrizofrc.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

El avance hacia una industria textil más sostenible y tecnológicamente innovadora ha colocado a las fibras naturales de origen animal en el centro de investigaciones orientadas a mejorar su aprovechamiento productivo. Particularmente, las fibras de camélidos sudamericanos —como la llama, alpaca y vicuña— poseen cualidades excepcionales (como suavidad, resistencia y capacidad térmica) que las posicionan como insumos de alta demanda en mercados de valor agregado. No obstante, su producción en regiones andinas de Argentina, especialmente en comunidades rurales, enfrenta barreras tecnológicas que dificultan el acceso a herramientas de evaluación de calidad, encarecen los procesos y limitan su competitividad.

El presente trabajo forma parte de un proyecto de investigación aplicada que propone el desarrollo de una herramienta tecnológica basada en algoritmos de aprendizaje automático, entrenada con imágenes digitales de fibras textiles capturadas mediante cámaras de dispositivos móviles. Esta solución permite la clasificación objetiva de fibras animales en función de parámetros clave como diámetro, presencia de médula y homogeneidad. La propuesta no solo apunta a sustituir métodos tradicionales (manuales o instrumentales) por una alternativa de bajo costo, sino que además incorpora criterios de escalabilidad y sostenibilidad, pensada para ser utilizada por pequeños y medianos productores en entornos de baja infraestructura tecnológica.

Los primeros resultados obtenidos en fase de validación demuestran la capacidad del sistema para generar evaluaciones de calidad consistentes, con una interfaz amigable y accesible que facilita la toma de decisiones productivas. Asimismo, se explora la posibilidad de aplicar el mismo algoritmo en otros tipos de fibras (vegetales y sintéticas), ampliando el alcance de la herramienta a sectores con necesidades similares de trazabilidad y control de calidad.

La propuesta ofrece una respuesta concreta a una problemática histórica del sistema productivo, y representa una alternativa replicable, escalable y con múltiples aplicaciones en la industria textil.

**Palabras Clave:** Competitividad, Métricas de calidad, Fibras vegetales y sintéticas, Tendencias.

**ABSTRACT**

The move towards a more sustainable and technologically innovative textile industry has placed natural fibres of animal origin at the centre of research aimed at improving their productive use. In particular, South American camelid fibres—such as llama, alpaca and vicuña—have exceptional qualities (such as softness, strength and thermal capacity) that make them highly sought-after inputs in value-added markets. However, their production in the Andean regions of Argentina, especially in rural communities, faces technological barriers that hinder access to quality assessment tools, make processes more expensive and limit their competitiveness.

This work is part of an applied research project that proposes the development of a technological tool based on machine learning algorithms, trained with digital images of textile fibres captured by mobile device cameras. This solution allows for the objective classification of animal fibres based on key parameters such as diameter, presence of pith and homogeneity. The proposal not only aims to replace traditional methods (manual or instrumental) with a low-cost alternative, but also incorporates criteria of scalability and sustainability, designed to be used by small and medium-sized producers in environments with low technological infrastructure.

The initial results obtained in the validation phase demonstrate the system's ability to generate consistent quality assessments, with a user-friendly and accessible interface that facilitates productive decision-making. Likewise, the possibility of applying the same algorithm to other types of fibres (vegetable and synthetic) is being explored, expanding the scope of the tool to sectors with similar traceability and quality control needs.

The proposal offers a concrete response to a long-standing problem in the production system and represents a replicable, scalable alternative with multiple applications in the textile industry.

**Keywords**: Competitiveness, Quality metrics, Vegetable and synthetic fibres, Trends.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria textil mundial ha experimentado una transformación profunda impulsada por factores como la creciente demanda de productos sostenibles, la trazabilidad en las cadenas de suministro y la necesidad de optimizar procesos productivos para reducir costos y tiempos sin sacrificar calidad. Este escenario ha impulsado la valorización de fibras naturales, especialmente aquellas con propiedades únicas que les otorgan ventajas competitivas en mercados de alto valor agregado.

Las fibras provenientes de camélidos sudamericanos como la llama, la alpaca y la vicuña poseen atributos excepcionales: suavidad, gran resistencia mecánica, alta capacidad térmica y propiedades hipoalergénicas. Estos factores las posicionan como materia prima de excelencia para confecciones de alta gama y textiles técnicos especializados.

En Argentina, la producción de fibras de camélidos se concentra principalmente en la región de la Puna, abarcando las provincias de Jujuy, Salta y Catamarca. En esta zona, la cría y esquila de camélidos no solo tiene relevancia económica, sino también cultural, siendo parte del patrimonio vivo de comunidades originarias. Sin embargo, a pesar de la calidad intrínseca de estas fibras, su potencial comercial se ve limitado por una serie de barreras estructurales y tecnológicas que impiden alcanzar estándares de calidad exigidos en mercados internacionales.

Uno de los principales obstáculos es la clasificación de las fibras. Los métodos manuales y subjetivos, junto con el alto costo de la instrumentación técnica, dificultan la adopción de procesos de evaluación precisos y reproducibles. Esto genera inconsistencias en la calidad de los lotes, pérdida de valor comercial y una fuerte dependencia de intermediarios para la colocación del producto.

En este contexto, la integración de tecnologías de aprendizaje automático y procesamiento digital de imágenes surge como una solución innovadora que puede transformar radicalmente el proceso de clasificación, haciéndolo más rápido, preciso y accesible. Este trabajo presenta una propuesta de desarrollo e implementación de un algoritmo entrenado para analizar imágenes de fibras animales, determinando métricas objetivas de calidad y generando reportes estandarizados que faciliten la toma de decisiones productivas y comerciales.

El enfoque no solo apunta a la fibra animal, sino que está diseñado para ser escalable hacia fibras vegetales, sintéticas y recicladas, ampliando así su alcance y relevancia en múltiples sectores productivos. Adicionalmente, se contemplan aplicaciones en campos tan diversos como la investigación forense y la clasificación faunística, aportando valor más allá de la industria textil.

## 2. ANÁLISIS DE FODA

El análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas), como una herramienta de gestión, permite realizar un análisis de la situación interna y externa de un proyecto de fibra textil animal, que identifica factores positivos y negativos del mismo, traducidos en factores internos (Fortalezas y Debilidades) y externos (Oportunidades y Amenazas).

*Tabla 1 FODA*

| **Factores Internos** | |
|---|---|
| **Fortalezas** | **Debilidades** |
| Excelentes propiedades térmicas como la termorregulación | Complejidad de la producción sostenible y posible falta de resistencia a la luz |
| Transpirabilidad | Producción compleja y costosa: cashmere, vicuña, o lana superfina |
| Aislamiento térmico | Baja resistencia a la luz |
| Sensación natural | Requerimientos de cuidado |
| Resistencia | Susceptibilidad a plagas |
| **Factores Externos** | |
| **Oportunidades** | **Amenazas** |
| Mercados de alto valor y nichos especializados | Competencia de las fibras sintéticas |
| Desarrollo de productos innovadores | Escasez de recursos silvestres |
| Tendencias de moda sostenible | Impacto ambiental de la producción |
| Nuevas tecnologías | Volatilidad del mercado |

Según datos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), se estima que en Argentina existen más de 150.000 ejemplares de llamas, cuya fibra es utilizada tanto en el mercado local como en exportaciones. Sin embargo, el nivel de industrialización es bajo y gran parte de la producción se comercializa sin un proceso estandarizado de clasificación, lo que reduce su valor final.

El principal cuello de botella para incrementar la competitividad de estas fibras radica en la falta de acceso a tecnología para evaluar su calidad. Entre los métodos actuales se encuentran:

- Inspección visual y táctil: Como ventaja se puede mencionar su bajo costo y rápida ejecución pero sus desventajas son la alta subjetividad, variabilidad entre evaluadores y su limitada reproducibilidad.
- Microscopía óptica tradicional: Permite medir diámetro con relativa precisión, pero se requiere equipamiento especializado, tiempo de preparación de muestras y capacitación técnica.
- Equipos de laboratorio como el OFDA (Optical Fibre Diameter Analyser) o Sirolan Laserscan que son equipos de alta precisión y arrojan resultados objetivos, pero en contraposición tienen un elevado costo de adquisición que puede rondar entre 30.000 USD y 60.000 USD, su mantenimiento es costoso y presentan una necesidad de infraestructura eléctrica y técnica estable.

Estas limitaciones tecnológicas hacen que la clasificación de fibras de alta calidad dependa de la capacidad de trasladar las muestras a laboratorios especializados, proceso que implica tiempos prolongados y costos de transporte que, en muchos casos, superan el valor mismo de la partida de fibra.

Otro factor de análisis es la brecha competitiva en mercados internacionales, dado que en los mercados premium, la calidad de la fibra es el factor determinante en el precio de venta. La falta de clasificación objetiva impide que las fibras argentinas se posicionen al nivel de productos similares provenientes de Perú o Bolivia, donde existen programas más consolidados de certificación de calidad. Esto genera un escenario en el que fibras de excelente calidad producidas en Argentina se venden como material genérico a precios considerablemente más bajos.

En este contexto, se presentan consecuencias socioeconómicas basadas en:

- Dependencia de intermediarios: los productores no pueden negociar directamente con compradores internacionales por falta de certificación técnica.
- Desigualdad en la distribución de beneficios: el valor agregado se concentra en etapas posteriores de la cadena, lejos del lugar de producción.
- Pérdida de oportunidades de diversificación: sin datos técnicos, es difícil acceder a mercados especializados como moda sostenible, textiles técnicos o decoración de alto nivel.

Un valor agregado lo constituye la posibilidad de integrar una herramienta de clasificación automatizada directamente en el entorno productivo, sin requerir infraestructura compleja, permitiría:

- Reducir costos de clasificación y transporte de muestras.
- Estandarizar la calidad en origen.
- Potenciar la autonomía tecnológica de comunidades rurales.
- Incrementar el valor comercial de la fibra y mejorar el ingreso de los productores.

### 2.1. Desarrollo de un prototipo made in Argentina

En la última década, la convergencia entre visión artificial y aprendizaje automático ha permitido desarrollar herramientas de análisis de materiales que antes requerían equipos costosos y personal especializado. Entre las tendencias más relevantes:

- Microscopía digital portátil: dispositivos compactos que se acoplan a cámaras de teléfonos móviles, reduciendo la dependencia de laboratorios centralizados.
- Procesamiento de imágenes en tiempo real: extracción de características mediante algoritmos que identifican patrones de textura, color, bordes y morfología.
- Redes neuronales convolucionales (CNN): arquitectura de IA capaz de procesar grandes volúmenes de imágenes, reconociendo patrones complejos y clasificando elementos con alta precisión.
- Aplicaciones en la nube: almacenamiento y procesamiento remoto de datos para análisis colaborativo y trazabilidad.

A pesar de la existencia de tecnología avanzada, su aplicación en contextos rurales argentinos es

escasa, debido a factores como:

- Alto costo de equipos importados.
- Falta de financiamiento para pequeños productores.
- Ausencia de capacitación técnica para operar y mantener equipos.

Este panorama presenta una oportunidad única para desarrollar una solución de bajo costo, fácil uso y adaptada a las condiciones locales, capaz de integrarse en el día a día de los productores sin requerir infraestructura compleja.

### 2.2. Metodología de trabajo sugerida

Un posible marco de trabajo, basado en etapas, se representa gráficamente:

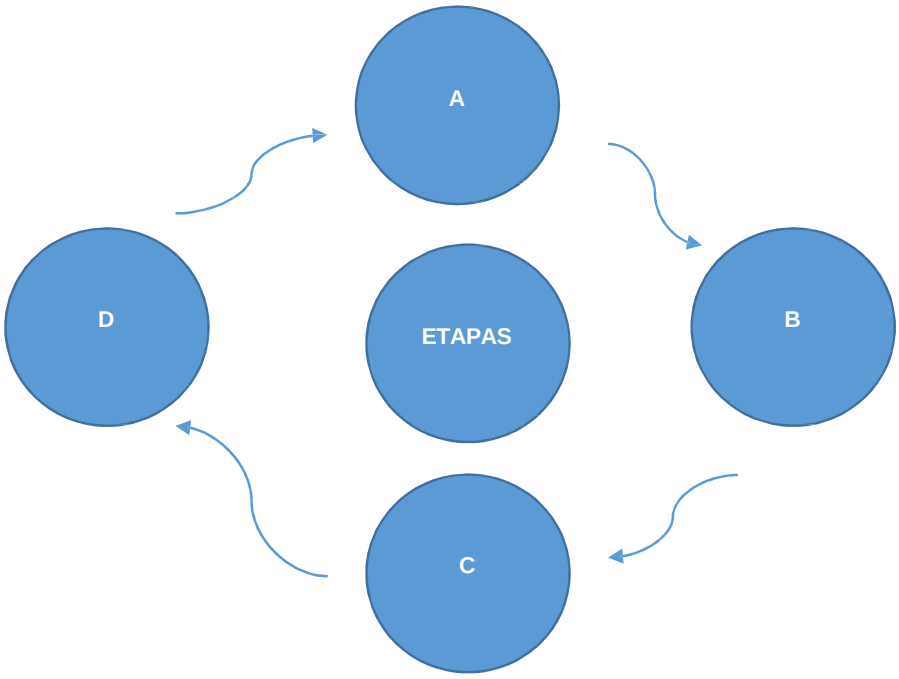



*Figura 1 Etapas sugeridas en la implementación de una metodología*

#### A. Recolección y preparación de muestras

Origen: fibras de llamas obtenidas en comunidades de la Puna (provincias de Jujuy y Salta). Condiciones de recolección: esquila manual siguiendo protocolos que minimizan el estrés animal.

Acondicionamiento: limpieza mecánica para remover materia vegetal y lavado con detergentes neutros para eliminar grasas y suciedad sin dañar la estructura de la fibra.

Almacenamiento: bolsas herméticas etiquetadas con información de origen, fecha y condiciones de recolección.

#### B. Captura de imágenes

Usa microscopios digitales portátiles (20x–1000x) acoplados a teléfonos móviles Android. Las imágenes fueron tomadas en formato JPEG y TIFF para garantizar compatibilidad y calidad.

Para capturar las imágenes se tienen en cuenta las condiciones de iluminación controlada para evitar sombras y reflejos, se escogieron múltiples ángulos y zonas de cada muestra para capturar variabilidad interna. Cada muestra genera un promedio de 15 a 20 imágenes de alta resolución.

#### C. Desarrollo del algoritmo

Se diseña un modelo basado en redes neuronales convolucionales (CNN) debido a su capacidad para procesar imágenes y extraer características complejas.

Preprocesamiento: normalización de color, reducción de ruido y segmentación de fibras de fondo.

Arquitectura: tres capas convolucionales con funciones de activación ReLU, seguidas de capa de pooling y una capa densa final para clasificación.

Entrenamiento: dividido en dataset de entrenamiento (70%), validación (20%) y prueba (10%).

Optimización: uso de *data augmentation* (rotación, zoom, desplazamiento) para mejorar la generalización del modelo.

**D. Validación en campo**

El algoritmo fue probado en talleres textiles de comunidades rurales. Los indicadores medidos fueron la precisión de clasificación comparada con resultados de laboratorio, el tiempo promedio por muestra y la usabilidad de la interfaz evaluada mediante encuestas a usuarios

Cabe aclarar que, la implementación piloto del algoritmo de clasificación de fibras animales se llevó a cabo en dos etapas diferenciadas: una de validación técnica en laboratorio y otra de validación funcional en entornos productivos reales.

Las pruebas controladas en laboratorio permitieron comparar el desempeño del algoritmo frente a mediciones realizadas con equipos de referencia (OFDA 2000).

La validación en comunidades rurales tuvo como objetivo evaluar la factibilidad de uso de la herramienta por parte de usuarios no especializados y en entornos con limitaciones técnicas.

Con relación a la compatibilidad de dispositivos, se notó un funcionamiento fluido en teléfonos Android gama media y su uso offline de las funciones de captura y clasificación operativas sin conexión, con sincronización diferida para almacenamiento en nube fue muy valorado.

### 2.3. Otras tendencias comerciales

Actualmente se pretende ampliar el campo de acción a otros tipos de fibra como fibras vegetales (algodón, lino, cáñamo y fibras derivadas de celulosa regenerada); fibras sintéticas (poliéster, nylon y fibras recicladas); y fibras híbridas (mezclas de fibras naturales y sintéticas.)

*Tabla 2 Otras categorías de materiales*

| | |
|---|---|
| **Fibras Vegetales** | Las plantas nos dan fibras como el algodón, el cáñamo, el lino, el yute, entre otros.<br>Naturales y biodegradables, las fibras vegetales son populares entre las marcas que buscan una mayor sostenibilidad en el abastecimiento de materiales<br>Desventajas: La producción convencional de algodón puede requerir un uso intensivo de productos químicos. Estos insumos pueden tener un impacto negativo en las comunidades locales y el ecosistema circundante.<br>La producción, el procesamiento y el transporte del cáñamo pueden consumir grandes cantidades de agua y energía. |
| **Sintéticos** | Los sintéticos son fibras fabricadas mediante procesos químicos. Ej. Poliéster y nailon<br>Tienen propiedades diferentes a las fibras naturales y suelen ser más elásticas, impermeables y resistentes a las manchas, lo que las hace muy atractivas para el consumidor. Representaron el 64 % del mercado mundial de fibras en 2021.<br>La producción de poliéster tiene un coste ambiental, se fabrica a partir de sustancias químicas derivadas de combustibles fósiles, cuya principal materia prima es el petróleo crudo. La producción comercial de poliéster convencional requiere etileno y etilenglicol.<br>El nailon requiere un alto consumo de energía para su fabricación y puede desprender fibras microplásticas durante su producción y uso. |
| **Biosintéticos** | Derivados total o parcialmente de fuentes naturales y renovables, podrían representar una alternativa más respetuosa con el clima que los sintéticos tradicionales y están atrayendo mucha atención en toda la industria.<br>Las materias primas deben obtenerse y gestionarse de forma responsable.<br>Los biosintéticos tienen un gran potencial. |

## 3. CONCLUSIONES

La transformación de la industria textil, impulsada por la sostenibilidad y la búsqueda de eficiencia, está llevando a un enfoque renovado hacia las fibras naturales. La llama, la alpaca y la vicuña son ejemplos de estas fibras que, además de ser sostenibles, ofrecen propiedades excepcionales como su suavidad, ligereza y resistencia. Estas características las posicionan en un nicho de mercado con alto valor agregado, donde la calidad es primordial.

La necesidad de trazabilidad en las cadenas de suministro también se ha vuelto crucial, especialmente para satisfacer la demanda del consumidor moderno que busca productos éticamente producidos y ambientalmente responsables. Esto ha llevado a la industria a buscar alternativas más accesibles y sostenibles que permitan a los pequeños y medianos productores competir en el mercado global. Al reemplazar métodos tradicionales por alternativas de costo reducido y escalables, se pueden incorporar tecnologías simples que no requieran infraestructura tecnológica avanzada. Esto incluye, por ejemplo, el uso de plataformas de comercio electrónico para acceder a mercados más amplios, capacitación en técnicas de producción más eficientes y el desarrollo de redes de colaboración entre productores locales. La implementación de estas estrategias no solo beneficiaría a los productores al aumentar su competitividad, sino que también contribuiría a la sostenibilidad de la industria textil al promover el uso de recursos locales y prácticas de producción éticas. De esta manera, la valorización de las fibras naturales se convierte en una oportunidad para revitalizar economías locales, preservar tradiciones culturales y responder a la creciente demanda de los consumidores por productos responsables y de alta calidad.

Este análisis no se limita a la automatización de la clasificación de fibras, sino que incorpora innovaciones con potencial transformador para la cadena de valor textil, a través de:

- Módulo de calibración automática: ajustando parámetros de captura en función de la iluminación y la calidad óptica del dispositivo utilizado. Esto permitiría la reducción de errores de medición por condiciones ambientales no controladas.
- Segmentación inteligente de fibras: algoritmos que identifican y aíslan fibras individuales en imágenes complejas, incluso cuando están parcialmente superpuestas.
- Reconocimiento de patrones morfológicos avanzados: identificación de anomalías como quiebres, nudos o impurezas directamente desde la imagen.
- Procesamiento en dispositivos móviles: eliminación de la dependencia de servidores externos, reduciendo costos y mejorando la privacidad de datos.

Este proyecto demuestra que es posible desarrollar una herramienta de clasificación de fibras basada en algoritmos de aprendizaje automático y procesamiento de imágenes que cumpla con tres requisitos clave: alta precisión, bajo costo y facilidad de uso en entornos rurales.

La clasificación objetiva y estandarizada de la fibra en origen permite que los productores negocien directamente con compradores nacionales e internacionales, eliminando intermediarios que históricamente concentran gran parte del valor agregado. Este cambio incrementa los ingresos netos del productor entre un 15% y un 30% en comparación con ventas sin clasificación; fomenta la permanencia de las comunidades en sus territorios, reduciendo la migración hacia centros urbanos; genera un incentivo para la mejora genética de los rebaños, ya que la calidad de la fibra se transforma en un parámetro económico tangible.

Esta visión fomenta la sustitución de fibras sintéticas por fibras naturales, lo que contribuye a la reducción de la huella de carbono y al cuidado de ecosistemas frágiles.

## 4. REFERENCIAS.


Alpaca Fiesta. (2021). *Manual de clasificación y tipificación de fibra de alpaca*. Arequipa: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú.

ASTM International. (2018). *Standard Test Method for Diameter of Wool and Other Animal Fibers by Microprojection*. ASTM D2130-18.

Cardellino, R., & Mueller, J. (2009). *Clasificación de la fibra de camélidos sudamericanos: manual de apoyo*. FAO.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA. (2019). *Producción y aprovechamiento de fibras de camélidos en la región andina*. INTA Ediciones.

International Wool Textile Organisation (IWTO). (2020). *Wool testing and standards*. IWTO Publications.

Lamas, H. E., & Mueller, J. P. (2015). Calidad y valorización de fibras de camélidos en la Puna argentina. *Revista Argentina de Producción Animal, 35*(1), 45–52.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO. (2017). *Fibras naturales y desarrollo sostenible*. FAO.

Organización Internacional de Normalización – ISO. (2016). *Textiles — Determination of fibre diameter of wool using an Optical Fibre Diameter Analyser (OFDA)*. ISO 11343:2016.

Rojas, A., & Poma, R. (2020). Innovación tecnológica para la clasificación de fibras de alpaca en comunidades altoandinas. *Revista de Innovación y Desarrollo Rural, 12*(2), 77–88.

Russell, R. A., & Hunter, L. (2021). Sustainable applications of animal fibres in textile production. *Journal of Cleaner Production, 278*, 123620. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123620

Saldaña, C., & Cayo, V. (2018). *Producción y mercado de fibras de llama y alpaca en Bolivia y Perú*. Banco de Desarrollo de América Latina – CAF.

Trotter, M., & Reid, R. (2018). Adv ances in machine learning for fibre diameter measurement. *Textile Research Journal, 88*(15), 1753–1765. https://doi.org/10.1177/0040517517699011

Zhang, X., Li, J., & Chen, H. (2019). Image-based fibre classification using convolutional neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture, 164*, 104897. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104897

# INTERFACES DE VINCULACIÓN UNIVERSITARIA Y DESARROLLO REGIONAL: DIAGNÓSTICO DESDE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL

Carrizo, Blanca; Gallego Ma. Laura; Cinalli, Marcelo; Abet, Jorge

*Facultad Regional Córdoba – Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional.*
GICAPP - GIMCO

bcarrizo@frc.utn.edu.ar / *mgallegos@frsn.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

Una Unidad de Vinculación Universitaria (UVU) constituye una interfaz estratégica entre la universidad y su entorno socio-productivo, canalizando demandas y promoviendo proyectos orientados al mejoramiento de la calidad de vida en la comunidad.

En este contexto, el presente estudio se enmarca en un proyecto de investigación interfacultad desarrollado por dos regionales de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), con el propósito de analizar, describir y diagnosticar los modelos de vinculación existentes entre universidades de la región centro de Argentina (Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos), desde la perspectiva de la Ingeniería Industrial. Se propone relevar factores determinantes que permitan caracterizar la situación actual y generar insumos relevantes para el diseño de estrategias de articulación institucional. Los sistemas de vinculación se configuran como entramados complejos de interacción entre múltiples actores. A lo largo del tiempo, estos sistemas han adoptado diversas formas de institucionalización y funcionamiento.

El estudio contempla el análisis de antecedentes normativos y de experiencias concretas de integración regional, considerando universidades con oferta de la carrera Ingeniería Industrial, sectores industriales y de servicios, organizaciones no gubernamentales y organismos del Estado.

**Palabras Claves:** Vinculación Universitaria. Ingeniería Industrial. Articulación. Sistemas de Vinculación.

**ABSTRACT**

A University Outreach Unit (UOU) serves as a strategic interface between the university and its socio-economic environment, channeling community needs and promoting projects aimed at improving the quality of life in the community.

In this context, this study is part of an interdisciplinary research project developed by two regional campuses of the National Technological University (UTN) in Argentina. Its purpose is to analyze, describe, and assess the existing outreach models implemented by universities in the central region of Argentina (Córdoba, Santa Fe, and Entre Ríos), from the perspective of Industrial Engineering. The study aims to identify key factors that characterize the current situation and generate relevant information for the design of institutional collaboration strategies. Outreach systems are complex networks of interaction among multiple stakeholders. Over time, these systems have adopted various forms of institutionalization and operation.

The study includes an analysis of relevant regulations and concrete examples of regional integration, considering universities offering Industrial Engineering programs, industrial and service sectors, non-governmental organizations, and government agencies.

**Keywords**: University Outreach. Industrial Engineering. Collaboration. Outreach Systems.

## 1. INTRODUCCIÓN Y MARCO CONCEPTUAL

En el marco del proyecto de investigación titulado “Diseño de un Modelo de Vinculación entre las Universidades y el Medio Productivo de la Región Centro desde la Perspectiva de las Competencias Curriculares de Ingeniería Industrial”, se plantea como objetivo relevar información relevante de los distintos ámbitos del contexto productivo. Con ello, se busca diseñar un modelo de vinculación entre las universidades de la Región Centro (Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos), tomando como caso de análisis la carrera de Ingeniería Industrial y su articulación con el sector productivo.

Las primeras experiencias de vinculación científico-tecnológica en América Latina, y particularmente en Argentina, se desarrollaron a partir de la década de 1990, en un contexto de transformaciones políticas y económicas nacionales y globales que impactaron directamente en la educación superior (Di Meglio, 2022). Según Di Meglio (2022), esta etapa culmina con el planteamiento de un nuevo paradigma, en el cual la vinculación tecnológica comienza a ser concebida desde una perspectiva social y territorial. Dicha orientación se materializa a través de la creación de instituciones que articulan con municipios, empresas y actores sociales del entorno. Ejemplo de ello son las iniciativas impulsadas por la Universidad Nacional de General Sarmiento, tales como el Programa de Desarrollo Tecnológico y Social y el Programa de Vinculación con los Gobiernos Locales. (Di Meglio, 2022)

El concepto de Unidad de Vinculación Universitaria (UVU) refiere a la interfaz que establece la universidad con su entorno, respondiendo a las demandas de asistencia y resolución de necesidades del medio. En este sentido, el modelo de innovación de triple hélice resulta central, ya que pone en valor las interacciones entre universidad, industria y Estado para promover el desarrollo. Este modelo, originalmente planteado por Sábato y Botana y luego retomado por Etzkowitz y Leydesdorff (1998) y Gallegos et al. (2021), define a la universidad como generadora de conocimiento, a la industria como productora de bienes y servicios, y al Estado como regulador, administrador y planificador. La integración estratégica y de largo plazo de estos tres sectores fomenta estructuras productivas con mayor competitividad internacional y efectos positivos en la socioeconomía. Posteriormente, el modelo evolucionó hacia la hélice cuádruple, que incorpora a la sociedad civil como cuarto componente, subrayando la articulación multisectorial de actores clave para impulsar el desarrollo regional y nacional (Carayannis & Campbell, 2009; Gallegos et al., 2021; Villanueva et al., 2024).

Entre las herramientas desarrolladas para fortalecer la vinculación se destaca TELAR (Tejiendo Lazos Regionales), orientada a contribuir al desarrollo sistémico, integral y sustentable de regiones periféricas. Este enfoque considera tanto el desarrollo económico como el social, y se fundamenta en el análisis integral de las cadenas de valor en las que participan las PyME y su impacto en el territorio (Kaplinsky & Morris, 2000; Pérez Lara et al., 2016; Yacuzzi, 2012; Zuntini, 2015). TELAR permite analizar la empresa en su contexto, integrando factores internos y relaciones externas. En consecuencia, contempla redes de interacción que incluyen empresas, infraestructura, instituciones gubernamentales, universidades, centros tecnológicos, cámaras de comercio, marcos normativos, cultura y sociedad en general (Arciénaga Morales, 2006; Delgado, 2010; Duque, 2016; Michalus & Hernández Pérez, 2016; Tassara, 2014).

Estos entramados requieren un adecuado sustento legal e institucional. En este sentido, las provincias de Córdoba y Santa Fe participan, desde 1998, en un proceso de integración regional amparado en el Tratado de Integración Regional, habilitado por la reforma constitucional de 1994 (art. 124), que faculta a las provincias a constituir regiones con fines de desarrollo económico y social, así como a crear organismos con competencias específicas para dicho propósito. Asimismo, en 2006 se conformó el Consejo de la Sociedad Civil de la Región Centro, integrado por instituciones y organizaciones no gubernamentales, lo cual garantiza la participación democrática del sector no estatal en la formulación de políticas regionales. El tratado establece como objetivos la consolidación del federalismo y la formulación de políticas comunes de desarrollo económico, social y cultural, promoviendo convergencias entre sistemas provinciales.

El estado del arte respecto a la vinculación entre universidades, especialmente en el contexto de la región centro de Argentina, revela un panorama diverso y dinámico. Diferentes modelos de cooperación se han desarrollado en respuesta a necesidades regionales específicas, así como a las demandas del mercado laboral (de cada provincia de la región centro) y los cambios en las políticas educativas.

En la región centro de Argentina, que incluye provincias como Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos, varias universidades ofrecen la carrera de Ingeniería Industrial o Licenciatura en Organización Industrial.

Algunas de ellas son:

- Universidad Nacional de Córdoba (UNC): Ofrece la carrera de Ingeniería Industrial.

- Universidad Tecnológica Nacional (UTN) - Facultad Regional Córdoba. Ofrece la carrera de Ingeniería Industrial.
- Universidad Blas Pascal. Ofrece la Licenciatura en Organización Industrial.
- Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral (UNL): Ofrece la carrera de Ingeniería Industrial.
- Universidad Tecnológica Nacional (UTN) - Facultad Regional Santa Fe: Ofrece la carrera de Ingeniería Industrial.
- Universidad Nacional de Rosario (UNR) En la provincia de Santa Fe (aunque su sede principal está en Rosario, es parte de la región centro), ofrece la carrera de Ingeniería Industrial.
- Entre Ríos: Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER): Ofrece la carrera de Ingeniería Industrial.
- Universidad Tecnológica Nacional (UTN) - Facultad Regional Concepción del Uruguay: Ofrece la carrera de Ingeniería Industrial.

Algunas universidades privadas también pueden ofrecer programas en estas áreas, por ejemplo:

- Universidad de Mendoza (sede Córdoba), Universidad Empresarial Siglo 21 (Córdoba).

En el plano institucional universitario, los proyectos inter facultades constituyen un mecanismo de articulación que integra dos o más facultades regionales con objetivos comunes, optimizando recursos humanos y materiales, evitando duplicaciones y fortaleciendo capacidades.

Entre los antecedentes se destaca el proyecto desarrollado en conjunto por la UTN-FRC y la UTN-FRSN, a través de los grupos de investigación GICAPP (Grupo de Investigación en Control Avanzado de Procesos y Producción) y GIMCO (Gestión, Innovación y Mejora Continua). Este proyecto, titulado “Diseñar una propuesta académica e-blended para la carrera Ingeniería Industrial desde el análisis de su diseño curricular centrado en competencias” (UTN-FRC, 2022-2024), evaluó la implementación de un diseño académico mixto, contrastando información entre ambas universidades.

En este marco, se propone repensar la vinculación de la Región Centro a partir del análisis de los diseños curriculares de Ingeniería Industrial, avanzando hacia la creación de un instrumento operativo de monitoreo de actividades vinculadas universidad–entorno productivo. Los resultados esperados incluyen la elaboración de documentos de buenas prácticas de vinculación, el desarrollo de un sistema digital de almacenamiento de datos y la implementación de procesos de formación y capacitación orientados a fortalecer la relación universidad–empresa y empresa–universidad.

## 2. METODOLOGÍA Y ETAPAS

Se emplea una metodología de tipo exploratoria y descriptiva, de análisis previo para avanzar a una etapa experimental. Se busca caracterizar el sector productivo de cada provincia involucrada, estableciendo sus actividades principales y de gran desarrollo, aquellas en proceso o potenciales y las que presentan mayor dificultad. También investigar conocer los programas de la carrera de Ingeniería Industrial en cada universidad, sus competencias y alcances, describiendo similitudes y diferencias entre cada Universidad. Los objetivos del proyecto se presentan en la Tabla 1.

*Tabla 1: Objetivos Específicos del Proyecto*

| N° | Objetivos Específicos |
|---|---|
| 1. | Describir y analizar los diseños curriculares y competencias de la carrera de Ing. Industrial de todas las universidades de la región centro |
| 2. | Definir y caracterizar el sector socio productivo de cada provincia a analizar |
| 3. | Analizar la pertinencia entre la oferta académica y la demanda del sector socio productivo. |
| 4. | Diagnosticar el grado de correspondencia entre la oferta académica y la demanda de la región centro. |
| 5. | Enunciar estrategias de resolución que permitan optimizar la relación entre la universidad versus oportunidades de la región |
| 6. | Evaluar el uso de otros instrumentos de relevamiento a medida de los requerimientos de escalabilidad del modelo. |
| 7. | Caracterizar la pertinencia de los proyectos de investigación de las universidades con las demandas del sector productivo de la región. |
| 8. | Identificar modelos metodológicos de vinculación existentes en otras regiones. |
| 9. | Evaluar si la oferta académica y las actividades de investigación de las universidades satisfacen las necesidades del sector productivo de la región centro. |

| |
|---|
| 10. Diseñar un instrumento operativo para monitorear las actividades de la región desde el seno de la Universidad. |
| 11. Transferir herramientas, metodologías y estrategias estudiadas, evaluadas y/o diseñadas tanto a la región centro como a las cátedras involucradas de cada carrera. |
| 12. Formar recursos humanos mediante el sistema de becas de alumnos y graduados, así como a través de la dirección de trabajos de Práctica Supervisada y Tesis o proyectos finales de carreras de grado. |
| 13. Difundir los resultados y conclusiones obtenidos al ámbito científico y académico mediante su presentación y publicación en Congresos. |

## 3. DESARROLLO

El análisis del contexto y los factores regionales que influyen en al proyecto, como el identificar problemas, oportunidades y variables sociales de impacto y reflexionar sobre el aporte al desarrollo sostenible que pueda generarse. Como herramienta de análisis se utiliza PESTEL (Político, Económico, Social, Tecnológico, Ecológico, Legal) para profundizar el diagnóstico externo, ofreciendo un marco más amplio para comprender las condiciones en que operan las UVU y los actores de la región centro.

Como punto de partida se prioriza los factores económicos para detectar:

- nivel de desarrollo económico regional;
- sectores productivos predominante;
- infraestructura y logística;
- políticas de inversión pública y privada;

los factores políticos como:

- instituciones de apoyo (gobiernos, universidades, cámaras);

y los factores sociales como

- los actores como parte interesadas del proyecto;
- y la población: tamaño, distribución, demografía.
- otra herramienta es la matriz FODA que da un diagnóstico interno/externo. El análisis completo fortalece y brinda una caracterización más completa del contexto que servirá de base para la aplicación posterior de la metodología Delphi.

Complementariamente, se utiliza la matriz FODA, que integra el diagnóstico interno y externo, proporcionando una caracterización más completa del contexto. Este análisis constituye la base para la posterior aplicación de la metodología Delphi, orientada a la priorización de factores críticos en la vinculación universidad–entorno.

### 3.1 Actores Relevantes para el Mapa de Vinculación (factor social)

El entramado de vinculación universitaria se configura por la interacción de múltiples actores con intereses, expectativas y roles diferenciados. El conjunto de actores identificado se detalla en la Tabla 2, y constituye la base para un mapa de vinculación y, en trabajos posteriores, podrá emplearse como insumo para una metodología Delphi orientada a la priorización de factores críticos de éxito en la vinculación universitaria.

*Tabla 2. Mapa de Actores Relevantes*

| Actor | Rol en la vinculación | Intereses/Expectativas | Categoría |
|---|---|---|---|
| Universidades y Facultades Regionales (UTN, UNC, UNL, UNER, etc.) | Generación de conocimiento, transferencia, formación profesional | Financiamiento, inserción social, prestigio institucional | Interno |
| Estudiantes y docentes-investigadores | Desarrollo de proyectos, innovación, formación aplicada | Capacitación, experiencia profesional, inserción laboral | Interno |
| Unidades de Vinculación Universitaria (UVU) | Gestión y coordinación de proyectos | Formalización, recursos, redes de cooperación | Interno |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Empresas industriales (automotriz, agroindustria, avícola, metalmecánica) | Implementación de innovaciones, competitividad | Tecnología, productividad, beneficios económicos | Externo |
| Sectores de servicios (software, logística, salud) | Aplicación de soluciones tecnológicas y de gestión | Innovación, eficiencia, expansión de mercado | Externo |
| Estado (nacional, provincial, municipal) | Diseño de políticas públicas y financiamiento | Impacto social, desarrollo económico, legitimidad política | Externo |
| ONGs y asociaciones profesionales | Articulación social y sectorial | Inclusión, impacto comunitario, sostenibilidad | Externo |
| Sociedad civil y comunidad local | Receptora de beneficios | Mejora de calidad de vida, empleo, desarrollo territorial | Externo |

A partir del mapeo anterior, se sientan las bases para identificar y establecer las instituciones claves de apoyo (factor político) de relevamiento de información.

**3.2 Caracterización del sector productivo regional (factor económico)**

Partiendo del supuesto de que el nivel de desarrollo económico regional se encuentra asociado a determinados sectores productivos, resulta necesario identificar si estos continúan siendo los predominantes o si han surgido nuevas actividades de relevancia. Asimismo, es fundamental analizar la infraestructura y logística disponibles, así como las políticas de inversión pública y privada que inciden en la dinámica productiva.

En la provincia de Córdoba, el entramado productivo se caracteriza por una fuerte presencia de la industria automotriz y autopartista, la metalmecánica, la maquinaria agrícola, la agroindustria, así como el desarrollo del software y de los servicios basados en el conocimiento. A ello se suman sectores en expansión o con alto potencial, tales como las energías renovables —particularmente el biogás y la energía solar—, la biotecnología aplicada al agro y la economía del conocimiento. No obstante, subsisten dificultades en determinadas industrias tradicionales que presentan una baja incorporación tecnológica, así como en numerosas PyME que enfrentan serias limitaciones para sostener su competitividad en los mercados internacionales.

En el caso de Santa Fe, las actividades predominantes se concentran en la agroindustria, con especial relevancia en la producción de soja, aceites, lácteos y frigoríficos, además de la metalmecánica, la maquinaria agrícola y el sector portuario y logístico. Entre los sectores emergentes destacan las energías renovables —en particular la eólica y la biomasa—, la economía circular y el fortalecimiento de clústeres de biotecnología en la ciudad de Rosario. A pesar de este dinamismo, existen debilidades en pequeñas industrias de bajo valor agregado, junto con la vulnerabilidad de ciertos rubros expuestos a la volatilidad del comercio exterior.

Por su parte, Entre Ríos sostiene un perfil productivo fuertemente vinculado a la producción avícola, en la que ocupa el primer lugar como exportador nacional, además de la citricultura, la producción láctea, el sector forestal y la agroindustria. Se identifican también áreas de crecimiento en el turismo sustentable, las energías alternativas y el agregado de valor en las cadenas forestales y madereras. Sin embargo, se observan limitaciones significativas en materia de infraestructura logística, así como en sectores primarios que aún muestran bajos niveles de industrialización local.

En conjunto, esta caracterización evidencia la diversidad productiva de la Región Centro, lo que refuerza la necesidad de diseñar modelos de vinculación flexibles y adaptativos, capaces de responder tanto a demandas consolidadas como a actividades emergentes, promoviendo al mismo tiempo la competitividad regional y la sostenibilidad a largo plazo.

**3.3 Análisis mediante herramientas**

Un análisis preliminar a partir de una matriz FODA (Figura 1) permite observar que las UVU cuentan con fortalezas ligadas a su experiencia acumulada y al capital humano disponible. Sin embargo, persisten limitaciones estructurales y organizacionales que condicionan su impacto. La Ingeniería

Industrial puede aportar una mirada sistémica que facilite la estandarización de procesos, la evaluación de resultados y la mejora continua en los modelos de vinculación.

La caracterización productiva de Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos muestra que cada provincia presenta sectores maduros y competitivos, pero también áreas en desarrollo y con dificultades. Esto abre un escenario fértil para el diseño de estrategias de vinculación diferenciadas, ajustadas a las demandas territoriales y a la diversidad de actores.

| | |
|---|---|
| **Fortalezas** | Existencia de Unidades de Vinculación en las facultades regionales de la UTN.<br>Trayectoria de proyectos conjuntos entre universidades y sectores productivos.<br>Capital humano calificado en Ingeniería Industrial con capacidad de gestión y transferencia.<br>Reconocimiento institucional de la vinculación como función universitaria. |
| **Debilidades** | Heterogeneidad en los niveles de formalización y funcionamiento de las UVU.<br>Limitaciones de financiamiento y recursos destinados específicamente a vinculación.<br>Escasa sistematización de indicadores de impacto de proyectos.<br>Dependencia de iniciativas individuales más que de políticas sostenidas. |
| **Oportunidades** | Creciente demanda de innovación por parte del sector productivo regional.<br>Políticas nacionales y provinciales de apoyo a la transferencia tecnológica.<br>Potencial de articulación regional a través de redes interuniversitarias.<br>Apertura hacia modelos colaborativos (triple y cuádruple hélice). |
| **Amenazas** | Contexto económico inestable que dificulta la continuidad de proyectos.<br>Desigualdad en el acceso a recursos entre universidades de distinto tamaño.<br>Riesgo de superposición de iniciativas sin coordinación regional.<br>Falta de incentivos claros para la participación empresarial sostenida. |

*Figura 1 Matriz FODA*

A los factores relevados en el punto 3 se puede complementar el análisis PESTEL con los siguientes aspectos:

| Factor | Aspectos Relevantes |
|---|---|
| **Político** | Existencia de políticas de innovación y transferencia; cambios en prioridades de gestión pública. |
| **Económico** | Dependencia del agro en Santa Fe y Entre Ríos; crisis macroeconómicas; potencial exportador (automotriz, avícola). |
| **Social** | Demanda de empleo calificado; necesidad de formación en competencias digitales; diversidad cultural e institucional. |
| **Tecnológico** | Avances en biotecnología, economía del conocimiento y energías renovables; brechas en pymes; polos tecnológicos. |
| **Ecológico** | Presiones ambientales por producción intensiva; potencial en economía circular y energías limpias; regulación ambiental. |
| **Legal** | Marcos regulatorios de innovación (Ley 23.877); normativas ambientales y bioseguridad; baja coordinación interprovincial. |

*Figura 2 PESTEL*

Dentro del aspecto social el mapa de actores puede definir con la figura siguiente:

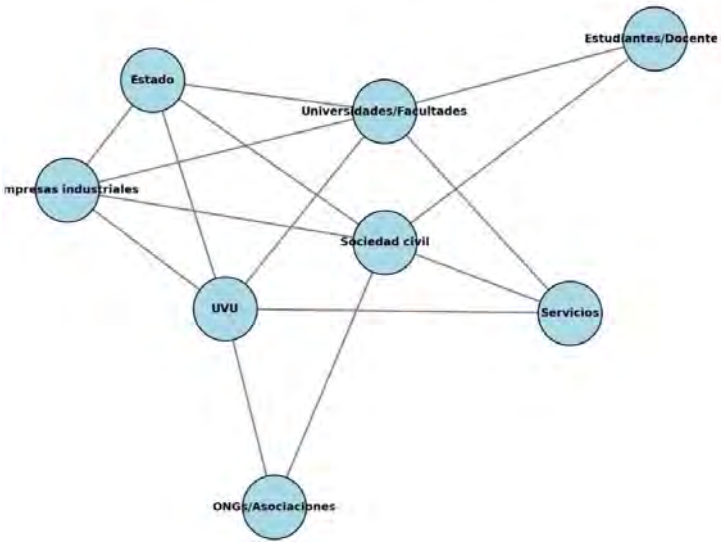



*Figura 3 Mapa de actores de la Vinculación Universitaria.*

**3. CONCLUSIONES.**

El presente trabajo constituye un punto de partida para el análisis de los modelos de vinculación universitaria en la región centro del país. El estudio contempla el análisis de antecedentes normativos y de experiencias concretas de integración regional, considerando universidades con oferta de la carrera Ingeniería Industrial, sectores industriales y de servicios, organizaciones no gubernamentales y organismos del Estado. Con la utilización de herramientas PESTEL se llegó a identificar los actores clave, sus roles en la vinculación, los intereses y las expectativas; y realizar una descripción de cada uno de ellos. Además, se caracterizó el sector productivo regional (Córdoba- Santa Fe – Entre Ríos) como factor económico, y poder confirmar o no la vigencia de la matriz productiva regional. Como factor político dentro de las instituciones de apoyo (gobiernos, universidades, cámaras) es necesario conocer los programas de la carrera de Ingeniería Industrial en cada universidad de la región (UTN, UNC, UCA Córdoba, UTN FRSF, UNR FCEIA, UCA Rosario, UTN Concordia) dentro del Factor Social y Culturales de educación y capital humano determinando sus competencias y alcances.

Se delineó un mapa preliminar de vinculación, se realizó una caracterización sectorial y se elaboró un diagnóstico FODA que evidencia tanto las fortalezas como las limitaciones del sistema actual.

Otras opciones a tener en cuenta son:

- Modelos de Vinculación: Los modelos de colaboración pueden variar entre alianzas estratégicas informales y convenios formalizados. Se han identificado iniciativas que promueven la investigación conjunta, programas de intercambio de estudiantes y docentes, y proyectos de extensión que benefician a la comunidad en general y en particular en las universidades que poseen la carrera ingeniería industrial. Cada modelo presenta sus ventajas y desventajas, dependiendo del contexto institucional y socioeconómico.
- Factores Determinantes: Entre los factores que inciden en el éxito de estas interacciones se destacan:
- Cultura Organizacional: La predisposición de las instituciones a colaborar y compartir recursos. Objetivos Comunes: La alineación en términos de objetivos educativos y de investigación. Disponibilidad de Recursos: Inclusión de recursos humanos, tecnológicos y financieros para llevar a cabo proyectos colaborativos.
- Políticas Públicas: La existencia de marcos normativos que promuevan la cooperación interinstitucional.
- Elementos Clave:
  - Comunicación Efectiva: La necesidad de canales de comunicación claros que faciliten el intercambio de ideas y proyectos.
  - Compromiso Institucional: La implicación activa de la alta dirección de las universidades en la promoción de vínculos estables.

- Feedback y Evaluación: La implementación de mecanismos de evaluación que permitan retroalimentar los procesos de vinculación.

Otros ítems destacados son:

- Diversidad y Complejidad: El análisis refleja una diversidad de modelos de vinculación que dependen de las características particulares de cada universidad y de la región. Esta complejidad requiere un enfoque flexible y adaptado a cada contexto.
- Interacciones Proactivas: Se ha evidenciado que las interacciones más exitosas son aquellas que proactivamente buscan integrar a varios actores, no solo universitarios, sino también del sector privado y público, generando un ecosistema que fomenta la innovación y el desarrollo regional.
- Oportunidades de Mejora: Es fundamental identificar áreas de mejora en la articulación institucional. La creación de espacios de diálogo y trabajo conjunto, así como la formalización de acuerdos, son pasos necesarios para fortalecer las relaciones existentes.
- Sostenibilidad de Iniciativas: Para que los modelos de vinculación sean sostenibles, es crucial que las universidades desarrollen estrategias que vayan más allá de proyectos puntuales y busquen establecer marcos permanentes de cooperación.
- Recomendaciones Futuras: Fomentar la investigación sobre la efectividad de los modelos actuales y promover la capacitación en gestión de proyectos colaborativos entre los diferentes actores involucrados, es clave para potenciar la vinculación entre universidades en la región centro de Argentina.

Los resultados sugieren la necesidad de avanzar hacia estrategias de cooperación inter facultad y regionales, con mayor formalización, recursos sostenibles y mecanismos de evaluación. A futuro, se plantea la posibilidad de aplicar la metodología Delphi para priorizar factores determinantes de éxito en la vinculación, involucrando a los distintos actores identificados.

## 4. REFERENCIAS


Proyecto de Investigación UTN-FRC. (2022-2024). Propuesta académica e-blended para la carrera ingeniería industrial desde el análisis de su diseño curricular centrado en competencias. Directora: Blanca Carrizo. Sede: UTN FR Córdoba.

Di Meglio, F. (2022) La vinculación científica-tecnológica ¿Hacia una perspectiva territorial o focalizada? Experiencias recientes en las universidades argentinas. Entramados, Vol. 9, N°12, 76-92.

Villanueva, B. M., Michalus, J. C., & Arciénaga Morales, A. A. (2022). Herramienta de vinculación colaborativa orientada a pequeñas y medianas empresas de regiones periféricas. Validación y ajuste mediante investigación-acción. Revista Científica "Visión de Futuro", 26(2),36-55. [fecha de Consulta 7 de octubre de 2024]. ISSN: 1669-7634. Recuperado de: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=357969624003

Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (1998). The Triple Helix a Model for Innovation Studies. Nueva York, EEUU: Routledge; 2nd edición (25 Septiembre 2017).

Carayannis, E., & Campbell, D. (2009). Modo 3' y 'Cuádruple hélice': hacia un ecosistema de innovación fractal del siglo XXI. Revista Internacional de Gestión de Tecnología (IJTM), 46 (3/4), 201-234. https://doi.org/10.1504/IJTM.2009.023374.

Gallegos María Laura, Cinalli Marcelo Fernando, Bárbaro Laura “Cursado, seguimiento y autoevaluación en Práctica: Resultados de uso de plataforma autogestionable para PPS”, XIV Congreso Internacional de Ingeniería Industrial 2021 (COINI), 19 al 24 de octubre 2021, UTN-Facultad Regional Buenos Aires, Argentina. Publicado en libro de memorias COINI 2021. ISBN 978-987-4998-86-6


## Agradecimientos


Los autores de este trabajo desean agradecer al apoyo incondicional de los integrantes de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UTN – FRC + FRSN.

# OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FIBRA DIETÉTICA A PARTIR DE SEMILLAS DE LIMÓN, UN RESIDUO AGROINDUSTRIAL

Villafañe, Tomás; Albarracin, Patricia M.; Alves, Nancy

*Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán*
*villafanetomas01@gmail.com*

**RESUMEN**

La industria citrícola tucumana procesa un millón de toneladas de limón al año y genera un gran flujo de semillas que se disponen como residuo.

El objetivo de este trabajo fue evaluar transformar ese material en una fuente de fibra dietaria.

Se partió de muestras de 100 gramos de semillas frescas de una citrícola local. Se estudiaron diferentes métodos de extracción de fibras y se decidió aplicar molienda seca y granulometría. Las fracciones obtenidas se analizaron con métodos estándar: Fibra Detergente Neutra (FDN, QPT 25_41), Fibra Detergente Ácida (FDA, QPT 25_40) y Lignina (QPT 25_42); que permitió calcular celulosa y hemicelulosa por diferencia numérica.

Los datos obtenidos de las muestras fueron promediados y mostraron que se partió de una humedad inicial de 58,8 % hasta 8,34 % de humedad residual de las semillas. Luego de la molienda y el tamizado, se comprobó que la fracción retenida en la malla Tyler 36 concentraba 52 % de la masa y se seleccionó esta como muestra representativa porque contiene la mayor proporción de celulosa y hemicelulosa insoluble, según estudios previos.

El perfil lignocelulósico de la fibra obtenida exhibió tres componentes estructurales: 14,52 % de celulosa, 8,30 % de hemicelulosa y 8,33 % de lignina, lo que confirma que la semilla de limón es una fuente moderada de fibra insoluble, comparable con otras tradicionales y se encuentra dentro del rango funcional para elevar la fracción dietaria en formulaciones alimentarias.

De lo realizado surgió la siguiente conclusión: es posible obtener fibra dietaria de las semillas de limón por molienda seca y posterior granulometría con malla Tyler 36. Esta fibra podría incorporarse a formulación de alimentos humanos y balanceados animales para lograr un mayor aporte de fibra insoluble y textura mejorada, logrando que un residuo actual se transforme en un activo económico.

**Palabras Claves:** Residuo, Caracterización, Economía Circular, Revalorización

**ABSTRACT**

The citrus industry in Tucumán processes one million tons of lemons per year and generates a large flow of seeds that are disposed of as waste.

The objective of this study was to evaluate the transformation of that material into a source of fiber.

Samples of 100 grams of fresh seeds, obtained from a local lemon processing facility, were used. Different fiber extraction methods were assessed, and dry milling followed by granulometric separation was selected. The resulting fractions were analyzed using standard methods: Neutral Detergent Fiber (NDF, QPT 25_41), Acid Detergent Fiber (ADF, QPT 25_40), and Lignin (QPT 25_42), which allowed cellulose and hemicellulose contents to be calculated by numerical difference.

The data obtained from the samples were averaged and showed a decrease in initial moisture from 58.8% to a residual moisture of 8.34%. After milling and sieving, it was determined that the fraction retained on Tyler mesh 36 concentrated 52% of the total mass and was selected as the representative sample, as prior studies indicate it contains the highest proportion of insoluble cellulose and hemicellulose.

The lignocellulosic profile of the resulting fiber exhibited three structural components: 14.52% cellulose, 8.30% hemicellulose, and 8.33% lignin, confirming that lemon seeds are a moderate source of insoluble fiber, comparable to traditional sources, and fall within the functional range to increase dietary fiber content in food formulations.

From these results, the following conclusion was drawn it is feasible to obtain dietary fiber from lemon seeds using dry milling and granulometric separation through Tyler mesh 36. This fiber could be incorporated into human food products and animal feed formulations to enhance insoluble fiber content and improve texture, transforming a current waste material into an economic asset.

**Keywords:** Residue, Characterization, Circular Economy, Valorization

## 1. INTRODUCCIÓN

La citricultura del Noroeste Argentino constituye una de las actividades agroindustriales relevantes en la región, tanto por su escala como por su grado de integración productiva, donde la continuidad entre la producción agrícola y el procesamiento en planta define una estructura integrada, en la que las condiciones del cultivo influyen en el rendimiento industrial, y los requerimientos del mercado orientan las decisiones técnicas en campo. Se ha impulsado una cadena de valor donde casi la totalidad del fruto es transformada en productos comercializables: jugo concentrado, aceites esenciales, cáscara deshidratada y pectina, entre otros. Sin embargo, en este esquema de producción se presenta una ineficiencia persistente: la semilla de limón, subproducto del despulpado mecánico, continúa tratándose como residuo sin un destino productivo definido.

La magnitud de la problemática adquiere relevancia en Tucumán, provincia que concentra el 74 % de la superficie plantada con limón y contribuye con el 95% del limón fresco que exporta el país, el 85% de las exportaciones de aceites esenciales, y el 82% del jugo de limón que Argentina envía al mundo (Departamento de Estudios Económicos, 2015).

La corriente sólida resultante de la separación de jugo y pulpa por medios centrífugos, que incluye fragmentos de hollejo, albedo y semillas, es dirigida a tamices vibratorios, donde las semillas quedan retenidas junto con partículas gruesas no deseadas. Dado que no forman parte del producto final y arrastran restos de pulpa, mucílago y aceite superficial, estas semillas son separadas y descartadas, siendo comúnmente enviadas a compostaje o disposición controlada (Shweta Suri, 2021). Esta situación implica no sólo una pérdida de recurso potencial, sino también un costo operativo para las empresas procesadoras, que deben gestionar su disposición conforme a normativas ambientales cada vez más estrictas (D.A. Zema, 2018).

A su vez, en los últimos años la agroindustria de limón en Tucumán ha incrementado sus exigencias sobre calidad en sus productos por lo que se han generado una mayor cantidad de residuos (Instituto de Desarrollo Productivo de Tucumán, 2020) (Sota, 2019).

Cabe destacar que, el sector agroalimentario ha intensificado la búsqueda de ingredientes funcionales de origen vegetal, impulsado por tendencias que valoran la sustentabilidad, el etiquetado limpio y el aprovechamiento de subproductos (Iriondo-DeHond, 2018). En ese marco, la fibra dietética ha cobrado protagonismo como insumo con aplicaciones tecnológicas y nutricionales diversas, especialmente en alimentos enriquecidos, productos libres de gluten, formulaciones balanceadas y alternativas para la nutrición animal (Djordjević, 2022).

Frente a este escenario, surge la hipótesis: es posible producir fibra a partir de semilla de limón y así aprovechar un residuo de la producción de cáscara deshidratada de limón, ser utilizado para la producción de alimentos balanceados y también otorgar propiedades a otros alimentos. Esta posibilidad cobra especial interés por tratarse de un flujo residual abundante, local, de bajo costo y actualmente subutilizado, lo que lo convierte en un candidato para estrategias de revalorización agroindustrial.

Este trabajo busca dar una respuesta concreta y tecnológicamente fundamentada a ese desafío, mediante la exploración del perfil lignocelulósico de la semilla de limón, la evaluación de métodos físicos de obtención de fibra. En lugar de competir con procesos ya consolidados, se propone una vía de valorización complementaria, que amplía el espectro de uso de la materia prima, reduce la generación de residuos y promueve un modelo integral de aprovechamiento industrial.

## 2. OBJETIVO GENERAL

Demostrar la factibilidad técnica y ambiental de valorizar las semillas de limón para obtener fibra dietética a partir de semillas de limón.

## 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1 Contexto productivo de la industria citrícola en Tucumán

La citricultura del Noroeste Argentino, con epicentro en la provincia de Tucumán, se ha consolidado como una de las cadenas agroindustriales de relevancia económica y social del país (Secretaría de Política Económica – Subsecretaría de Programación Microeconómica., 2018) (Aguaysol, 2025). Tucumán dispone actualmente de 45.500 hectáreas cultivadas con limón, superficie que equivale al 74% del total nacional; durante la campaña 2024 se obtuvieron 1.815.000 toneladas de fruta, volumen

que representa el 78% de la producción argentina de limón (Federcitrus, 2024). A escala nacional, la cosecha bruta de limón alcanzó 2.315.427 toneladas ese año; descontadas las mermas poscosecha, estimas entre 11% y 19%, el volumen neto se situó en 1.994.319 toneladas, de las cuales 1.456.211 toneladas, el 51,8 %, ingresaron a procesos industriales para la elaboración de jugo concentrado, cáscara deshidratada y aceites esenciales (Federcitrus, 2024). Aplicando la participación tucumana del 78 % a dicho flujo, se deduce que aproximadamente 1.135.845 toneladas de limón se industrializaron en la provincia.

Dentro de ese engranaje la semilla queda fuera del circuito de alto valor: aparece como fracción retenida en tamices junto con fragmentos de hollejo; se transporta por tornillos sinfín y, con frecuencia, se envía a compostaje o a descarte controlado (Shweta Suri, 2021). Su revalorización buscaría completar el concepto de “cero desperdicios”.

Convertir la semilla en ingrediente fibroso no compite con los circuitos ya rentables, sino que agrega una capa de valor sobre el último residuo sólido disponible, alineándose con los lineamientos de economía circular promovidos por distintos organismos como la Dirección de Residuos Sólidos y Economía Circular en Tucumán.

### 3.2 Fibra dietética

La fibra dietética es cualquier material comestible que no sea hidrolizado por las enzimas endógenas del tracto digestivo humano y que pueden estar (a) de forma natural en el alimento, (b) obtenidos del alimento por procesos físicos, enzimáticos o químicos, o (c) fabricados de forma sintética, siempre que demuestren un efecto beneficioso en la salud. Se pueden clasificar en fibra soluble y fibra insoluble.

#### 3.2.1 Fibra soluble

Es la fracción que se dispersa en agua y forma soluciones o geles. En el estómago y el intestino delgado esos geles ralentizan el vaciado gástrico y la absorción de glucosa, lo que ayuda a controlar picos de azúcar y a reducir la absorción de colesterol. Una vez en el colon las bacterias la fermentan y producen ácidos grasos beneficiosos. Incluye pectinas, gomas y algunas hemicelulosas.

#### 3.2.2 Fibra insoluble

Es la parte de la fibra que no se disuelve en agua. Absorbe agua dentro del bolo alimenticio, aumenta su volumen y ayuda a que el contenido avance con mayor rapidez a lo largo del intestino grueso, promoviendo regularidad. Está formada sobre todo por celulosa, parte de hemicelulosa y lignina.
La celulosa es un polisacárido lineal de glucosa que se empaqueta en microfibrillas muy resistentes; proporciona rigidez estructural y, al ser poco soluble, se clasifica como fibra insoluble.
La hemicelulosa agrupa polisacáridos ramificados que enlazan las microfibrillas de celulosa y confieren capacidad de hinchamiento en agua; parte de ella puede fermentar en el colon y actuar como fibra prebiótica.
La lignina es un polímero aromático tridimensional que envuelve las fibras celulósicas, las hace más rígidas y protege frente a la degradación química y microbiana; por eso reduce la digestibilidad, aunque aporta estabilidad térmica y propiedades antioxidantes.
La proporción entre celulosa y lignina es un buen indicador del equilibrio entre robustez física y funcionalidad tecnológica: relaciones cercanas a 2 ofrecen rigidez moderada con cierta capacidad de hidratación, mientras que valores muy altos o muy bajos desplazan el balance hacia matrices frágiles o, por el contrario, demasiado recalcitrantes

*Tabla 1: Clasificación de la fibra dietética.*

| Fibra dietética | |
|---|---|
| Fibra insoluble | Fibra soluble |
| Celulosa | Pectinas |
| Hemicelulosa | Mucílagos |
| Lignina | Gomas |

## 4. MATERIALES Y METODOS

### 4.1 Materiales

Se utilizó semilla de limón proveniente de una planta procesadora citrícola local ubicada en la provincia de Tucumán, Argentina. Se recolecto las muestras directamente desde la línea de elaboración de cáscara deshidratada, en la etapa de separación de sólidos gruesos, durante el mes de febrero de 2025. El material se encontraba en estado fresco, con presencia de mucílago, fragmentos pequeños de cáscara y restos de pulpa, los mismos son características típicas del subproducto post-despulpado. Las semillas fueron recolectadas en recipientes plásticos limpios y trasladadas al laboratorio, donde se almacenaron en condiciones refrigeradas (4 °C) hasta su procesamiento

### 4.2 Métodos

#### 4.2.1 Determinación de contenido humedad de la semilla fresca

Se determinó el contenido de humedad mediante el método gravimétrico ISO 665. Se pesaron tres alícuotas de 100 g (± 0,1 g); las muestras se secaron en horno tipo mufla con control de temperatura a (100 °C ± 1 °C) hasta peso constante y, posteriormente, se estabilizaron en desecador a temperatura ambiente antes de su registro.



*Figura 1: Horno tipo mufla*

#### 4.2.2 Secado y molienda

Las semillas destinadas al estudio granulométrico se deshidrataron en horno tipo mufla a 60 °C ± 1 °C hasta peso constante. Después se estabilizaron en un desecador, el material se molió en licuadora de cuchillas durante 3 minutos, aplicando pulsos de 20 segundos separados por intervalos de reposo que disiparon el calor y evitaron el aglomerado de la muestra, obteniéndose una harina homogénea apta para la clasificación por tamices.



*Figura 2: Semillas en el proceso de secado*



*Figura 3: Estabilizado en desecador con sílica gel*

#### 4.2.3 Análisis preliminar y selección de tamices

Una alícuota de la harina fue tamizada en una columna Tyler compuesta por los tamices número 10, 20, 36, 85, 140 y fondo receptor. La columna se montó en un agitador (Ver Figura 4) y se vibró durante

5 minutos con amplitud media. El procedimiento se realizó por duplicado; tras cada corrida, se retiró la columna, se pesó el material retenido en cada nivel y se calculó la distribución porcentual. Con base en dicha distribución y en referencias que sitúan el intervalo de 400–800 µm como óptimo para concentrar fibra insoluble funcional, se seleccionó un juego reducido de tamices 20, 36 y 85 para los ensayos siguientes.



*Figura 4: Agitador de tamices*

### 4.2.4 Tamización duplicada con tamices

La harina seca se fraccionó en la columna de tamices seleccionada (números 20, 36 y 85, más fondo receptor). La columna se vibró durante 5 minutos con amplitud media y el procedimiento se ejecutó por duplicado para verificar la reproducibilidad. Después de cada corrida se registró la masa retenida en cada malla. Con base en el patrón de distribución obtenido y en referencias que señalan que las partículas > 800 µm contienen mayormente flavedo y albedo, ricos en pectina y aceites esenciales, y que las < 200 µm tienden a acumular almidón dañado y azúcares, se restringió el análisis posterior a la fracción retenida por la malla 36, considerada óptima para concentrar celulosa y hemicelulosa insolubles.

### 4.2.5 Preparación de la muestra compuesta (malla 36)

Los retenidos de la malla 36 se mezclaron manualmente durante cinco minutos y se dividieron en dos réplicas de 50 g. Las réplicas se conservaron herméticas en desecador hasta el análisis.

### 4.2.6 Análisis detergente de fibra

Las réplicas de harina correspondiente a la fracción retenida por la malla 36 se sometieron a métodos estándar para la determinación de fibra detergente neutra (FDN, QPT 25_41), fibra detergente ácida (FDA, QPT 25_40) y lignina (QPT 25_42). Con estos datos se calcularon celulosa y hemicelulosa por diferencia numérica.

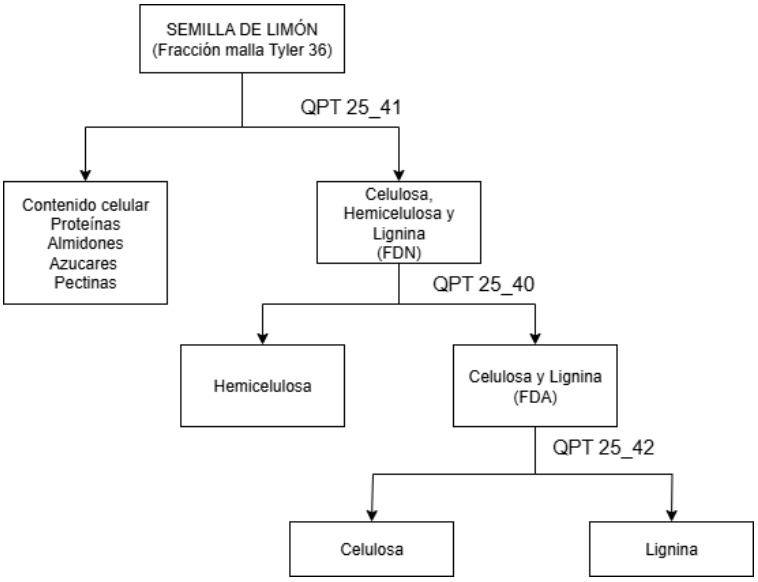



*Figura 5: Metodología seguida para la obtención del perfil lignocelulósico.*

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Humedad de la semilla

El análisis gravimétrico ISO 665 aplicado a tres alícuotas de 100 g reveló un contenido de humedad de 58,8 % ± 0,7 % en la semilla recién obtenida del equipo finisher. Este valor corresponde a la fracción de agua que las semillas retienen tras su separación del flujo de pulpa y cáscara, e implica que más de la mitad de la masa inicial se atribuye a humedad libre o ligada. La cifra obtenida se utilizará como referencia para dimensionar la etapa de secado previa a la molienda y para estimar el balance másico total del proceso de valorización.



*Figura 6: Semillas secas posterior a la determinación su humedad*

### 5.2 Secado y molienda

El lote de semilla fresca se sometió a un secado en mufla a 60 °C hasta alcanzar una humedad residual de 8,34 %**,** valor coherente con los márgenes de 6–10 % recomendados para semillas cítricas antes de su acondicionamiento mecánico (Agustín Benestante, 2023)

Una vez enfriado el material, la molienda por pulsos, tres minutos netos en licuadora de cuchillas en intervalos de 20 segundos, produjo una harina gruesa, libre de grumos, adecuada para la clasificación granulométrica posterior (Ver Figura 7). Durante la operación no se detectaron signos de sobrecalentamiento ni de pérdida de material por volatilización, de modo que la humedad remanente se mantuvo dentro del objetivo operativo (< 10 %).



*Figura 7: Harina gruesa de semilla de limón obtenida en la molienda*

### 5.3 Selección de tamices

Para evaluar cómo se reparte la harina de semilla según el tamaño de partícula, se sometió una carga de 100 g a la columna compuesta de mallas Tyler. Se obtuvo fracciones retenidas en cada tamiz como se puede observar en la Figura 8.



*Figura 8: Fracción retenida en tamiz de malla Tyler 36*

Los porcentajes de masa retenida en cada intervalo se resumen en la Tabla 2, mientras que la Figura 9 ilustra el mismo conjunto de datos en forma de histograma y la Figura 10 presenta la curva acumulada del porcentaje retenido.

*Tabla 2: Tabla de análisis granulométrico por tamizado en seco*

| Análisis de malla Tyler | Malla Tyler | Abertura (mm) | Abertura promedio (mm) | Masa promedio retenida (g) | Fracción en peso | Fracción en peso (acumulada) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 10 | 1,651 | 1,651 | 16 | 0,172 | 0,172 |
| -10 + 20 | 10 | 1,651 | 1,242 | 1 | 0,011 | 0,183 |
| | 20 | 0,833 | | | | |
| -20 + 36 | 20 | 0,833 | 0,625 | 48 | 0,516 | 0,699 |
| | 36 | 0,417 | | | | |
| -36 + 85 | 36 | 0,417 | 0,294 | 18 | 0,194 | 0,892 |
| | 85 | 0,170 | | | | |
| -85 + 140 | 85 | 0,170 | 0,138 | 9 | 0,097 | 0,989 |
| | 140 | 0.106 | | | | |
| -140 | 140 | 0.106 | 0,106 | 1 | 0,011 | 1,000 |

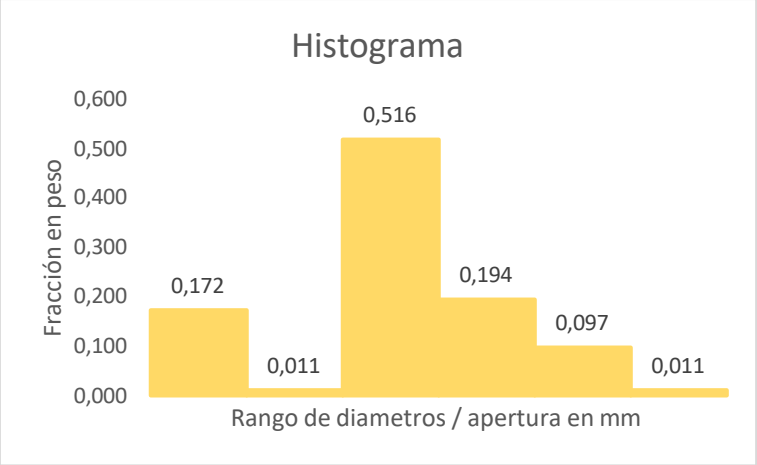



*Figura 9: Histograma de distribución granulométrica*

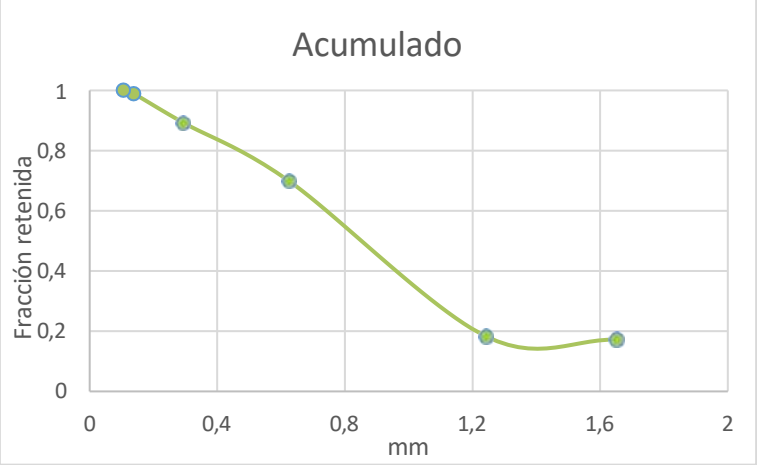



*Figura 10: Curva granulométrica de retenido porcentual acumulado*

Con base en estos resultados se adoptó un juego reducido de tamices conformado por las mallas 20, 36 y 85 para una segunda clasificación. La distribución obtenida permitió construir la Tabla 3 y la Figura 11 y la misma confirmó el patrón observado: la malla 36 concentró ahora el 53 % de la carga cribada, mientras que las fracciones de 850 µm y < 180 µm aportaron 17 % y 10 %, respectivamente. Esta demuestra que la fracción representatividad refuerza que la fracción 417–800 µm es la dominante en la harina de semilla de limón.

*Tabla 3: Tabla de análisis granulométrico por tamizado en seco de la segunda clasificación*

| Análisis de malla Tyler | Malla Tyler | Abertura (mm) | Abertura promedio (mm) | Masa promedio retenida (g) | Fracción en peso | Fracción en peso (acumulada) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 20 | 0,833 | 1,651 | 17,93 | 0,179 | 0,179 |
| -20 + 36 | 20 | 0,833 | 0,625 | 53,78 | 0,538 | 0,717 |
| | 36 | 0,417 | | | | |
| -36 + 85 | 36 | 0,417 | 0,294 | 17,95 | 0,180 | 0,897 |
| | 85 | 0,170 | | | | |
| -85 | 85 | 0,170 | 0,170 | 10,32 | 0,103 | 1,000 |

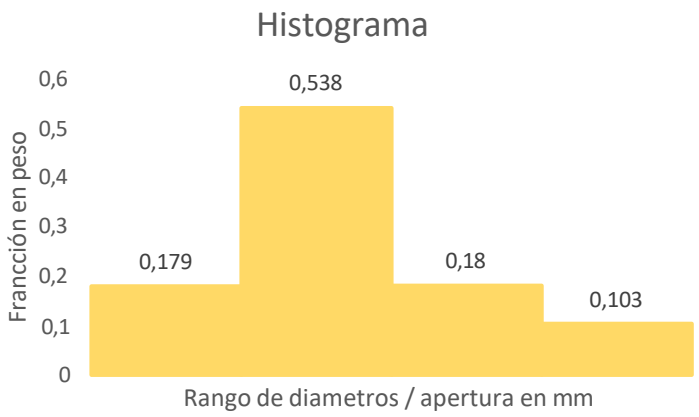



*Figura 11: Histograma de distribución granulométrica de la segunda clasificación*

Dado que la malla 36 reúne la mayor parte de la masa procesada y, según (Hernandez, 2006), las partículas entre 400 y 800 µm concentran la fibra insoluble funcional, se seleccionó definitivamente esta fracción para los ensayos de fibra detergente. La decisión se sustenta además en criterios económicos: limitar el análisis a la fracción mayoritaria reduce el consumo de reactivos y tiempo sin comprometer la representatividad de los resultados obtenidos.

### 5.4 Perfil lignocelulósico de la semilla de limón tucumano

Con los resultados obtenidos de los ensayos de fibra detergente se confecciono la Tabla 4.

Así, la secuencia experimental: determinación de humedad, secado, molienda, tamizado duplicado, preparación de muestra media y análisis detergente de fibra, permitió establecer de manera consistente el perfil lignocelulósico de la fracción de semilla más abundante y, por tanto, la más representativa para evaluar su potencial aplicación tecnológica.

La composición lignocelulósica de la fibra obtenida a partir de semillas de limón presentó un contenido de celulosa de 14,52 %, hemicelulosa de 8,30 % y lignina de 8,33 %, valores expresados en base seca. Esta proporción permite establecer una caracterización funcional de la matriz fibrosa y compararla con otras fuentes de fibra derivadas de residuos cítricos.

*Tabla 4: Resultados de la caracterización de la fibra en las fracciones de malla 36*

| Tipo de muestra | Ensayo | Procedimiento Técnico | Resultado |
|---|---|---|---|
| Semilla de limón | Fibra Detergente Neutra (FDN) | QPT 25_41 | 31,15 % |
| | Fibra Detergente Acida (FDA) | QPT 25_40 | 22,85 % |
| | Celulosa | Calculo (FDA – lignina) | 14,52 % |
| | Hemicelulosa | Calculo (FDN – FDA) | 8,30 % |
| | Lignina | QPT 25_42 | 8,33 % |

En base a los datos obtenidos y comparándolos con datos obtenidos para distintas fuentes de fibra cítrica: pulpa de limón, cáscara de limón, cáscara de mandarina, cáscara de naranja, se confecciono la Tabla 5.

*Tabla 5: Comparativa entre distintas fuentes de fibra de cítricos*

| Fuente de fibra | Celulosa (%) | Hemicelulosa (%) | Lignina (%) | Cel/Lign | Referencia |
|---|---|---|---|---|---|
| Semilla de limón | 14,52 | 8,3 | 8,33 | 1,74 | - |
| Pulpa de limón | 36,2 | 11,1 | 7,6 | 4,76 | Magalhães et al., 2023 |
| Cáscara de limón | 23,1 | 8,1 | 7,6 | 3,04 | Magalhães et al., 2023 |
| Cáscara de mandarina | 22,5 | 6,0 | 10,0 | 2,25 | Dubey et al., 2023 |
| Cáscara de naranja | 12,4 | 7,5 | 8,9 | 1,39 | de Castro et al., 2024 |

La celulosa, principal fracción estructural de las fibras vegetales, representa en este caso un valor moderado en comparación con otras fuentes como la pulpa de limón (36 %) o la cáscara (23 %). Si bien una mayor proporción de celulosa se asocia con mayor rigidez estructural y mayor capacidad de retención de agua, el contenido hallado en la semilla sugiere una matriz más flexible, lo cual puede resultar favorable en formulaciones alimentarias donde se busca mejorar el perfil nutricional sin generar cambios significativos en la textura del producto final.

La hemicelulosa, con un valor del 8,30 %, se encuentra en niveles similares a los reportados para cáscaras de limón y naranja, y desempeña un papel importante en la retención de agua y aceites, así como en la viscosidad y cohesión de las mezclas alimentarias. Esta fracción contribuye a la funcionalidad tecnológica de la fibra, especialmente en productos húmedos, masas y alimentos balanceados, donde actúa como agente aglutinante natural.

En cuanto a la lignina, la muestra presentó un 8,33 %. Este componente no digerible aporta estructura y estabilidad a la fibra, pero su exceso puede reducir la digestibilidad en aplicaciones animales. En este caso, su proporción moderada permite su uso en alimentos y formulaciones balanceadas.

La relación celulosa/lignina obtenida fue de 1,74, inferior a la de otras matrices cítricas, lo cual indica una fibra con menor rigidez y una proporción más equilibrada entre estructura y fracción no fermentable. Este equilibrio puede traducirse en una buena procesabilidad industrial y facilidad de incorporación en matrices alimentarias.

### 5.5 Aplicaciones potenciales de la fibra de semilla de limón

#### 5.5.1 Panificados, pastas y cereales extruidos

La fibra obtenida de la semilla de limón ha demostrado propiedades funcionales comparables a las de otras fibras cítricas comerciales, especialmente en lo que respecta a su elevada capacidad de retención

de agua asociada a la presencia de hemicelulosa (Chun-ai He, 2023). Esta característica permite mejorar la hidratación de las masas, factor crítico en panificados sin gluten donde la ausencia de la red proteica dificulta la formación y estabilidad de la estructura del pan.

Estudios recientes, donde se utilizó fibra cítrica proveniente de cáscaras, han demostrado que la adición de fibras cítricas en formulaciones de panificados y panificados libres de gluten mejora parámetros como la cohesividad, elasticidad y resiliencia de la miga, a la vez que reduce el endurecimiento del pan durante su almacenamiento, lo que resulta en una menor velocidad de envejecimiento (staling) (Bugarín, 2023). Además, el uso de esta fibra permite incrementar el contenido total de humedad sin aumentar la pérdida por evaporación durante el horneado, contribuyendo así a una textura más húmeda, una de las principales debilidades sensoriales en panes sin gluten (Bugarín, 2023).

### 5.5.2 Nutrición animal y snacks para mascotas

El aprovechamiento de subproductos agroindustriales como la fibra cítrica proveniente de pulpa de frutas cítricas ha demostrado ser una estrategia efectiva y sustentable para su incorporación en la alimentación de animales rumiantes. Se ha evidenciado que la inclusión de pulpa cítrica fresca en dietas de novillos en confinamiento (feedlot) hasta niveles del 30 % no solo no compromete el rendimiento productivo ni la calidad de la carne, sino que mejora parámetros clave como la ingesta de materia seca, la eficiencia alimentaria y la capacidad antioxidante del producto final (Luzardo, 2021).

## 5.6 Reducción de RSU por revalorización de semilla de limón

La industria citrícola tucumana procesa aproximadamente 1.100.000 toneladas por año de limón fresco. Considerando una proporción media de 1,68 % de semilla por fruto maduro (Huera, 2006), se estima un flujo de 18.480 toneladas/año de semilla fresca. Por exigencias de calidad del producto de cáscara deshidratada, el 100 % de las semillas de limón es retirado de la corriente proveniente del finisher antes del secado; por ello, la recuperación de semillas se considera total. En el esquema convencional, este flujo sería trasladado y enterrado en rellenos sanitarios, generando elevados costos de gestión y un impacto ambiental significativo.

En términos logísticos, la cantidad evitada equivale a 924 viajes de camión batea de 20 toneladas, cuyo traslado ya no sería necesario. Si se adopta una densidad aparente de 0,6 t/m³ para semilla húmeda a granel (El-Sayed et al., 2018), el residuo desviado del sistema representa aproximadamente 30.800 m³ de material que no ocuparía espacio en rellenos sanitarios, lo que equivale al volumen de más de 12 piletas olímpicas de natación de 2.500 m³ cada una.

El aporte ambiental puede también cuantificarse en términos de gases de efecto invernadero. Utilizando factores de emisión del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, que oscilan entre 0,2 y 0,6 $tCO_2e$ por tonelada de residuo orgánico dispuesto en vertedero (IPCC, 2006), la revalorización de semillas permite evitar entre 3.696 y 11.088 toneladas de $CO_2$ equivalente por año. Para dimensionar esta magnitud, puede compararse con eliminar las emisiones directas de entre 840 y 2.500 automóviles particulares, suponiendo un promedio de 4,4 $tCO_2e$ por vehículo/año (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 2016).

## 6. CONCLUSIONES.

La presente investigación sirvió para confirmar la hipótesis de que es posible obtener fibra dietética a partir de semillas de limón, demostrando la factibilidad de producir un ingrediente funcional. Esta propuesta constituye una innovación para la gestión de residuos agroindustriales al transformar subproductos actualmente subutilizados en insumos funcionales con aplicación tecnológica.

Desde el punto de vista experimental, se determinó el contenido de humedad inicial, y se estableció el perfil lignocelulósico de la harina obtenida, 14,52 % de celulosa, 8,30 % de hemicelulosa y 8,33 % de lignina. Estos resultados sirvieron como base para sustentar su empleo como ingrediente funcional en panificados y, alternativamente, como componente fibroso en alimentos balanceados para animales.

El aprovechamiento de la semilla de limón reduce la presión sobre los sistemas de disposición final de residuos, sino que también constituye una estrategia eficaz de mitigación del cambio climático al evitar emisiones. En conjunto, los beneficios evidencian que la valorización transforma un flujo pasivo y contaminante en un recurso con aplicaciones industriales y alimentarias, materializando en la citricultura tucumana los principios de economía circular y contribuyendo a la transición hacia una producción más sostenible.

## 7. REFERENCIAS.


Aguaysol, m. (2025). Riesgos y desafíos para el citrus de tucumán. *La gaceta*.

Agustín Benestante, M. C. (2023). Physical and mechanical properties of lemon (Citrus lemon) seeds. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 205-213.

Bugarín, R. &. (2023). Can Citrus Fiber Improve the Quality of Gluten-Free Breads? *Foods*.

Chun-ai He, J.-r. Q.-s.-t.-l. (2023). Excellent hydration properties and oil holding capacity of citrus fiber: Effects of component variation and microstructure. *Food Hydrocolloids*.

D.A. Zema, P. C. (2018). Valorisation of citrus processing waste: A review,. En *Waste Management Vol 80* (págs. 252-273).

de Castro, S. C. (2024). Sequential extraction of hesperidin, pectin, lignin, and cellulose from orange peels: Towards valorization of agro-waste.

Departamento de Estudios Económicos. (2015). Citricultura. En *Citricultura. Estudio de la cadena de valor* (págs. 30-59).

Djordjević, M. D.-S. (2022). Delving into the Role of Dietary Fiber in Gluten-Free Bread Formulations: Integrating Fundamental Rheological, Technological, Sensory, and Nutritional Aspects. En *Polysaccharides* (págs. 59-82.).

Dubey, P. T. (2023). Current scenario and global perspectives of citrus fruit waste as a valuable resource for the development of food packaging film.

El-Sayed, A. E.-M. (2018). Physical properties of lemon seeds and kernel relevant to separation and handling. *Journal of Food Engineering*, 46-54.

Federcitrus. (2024). La actividad citricola The Argentine Citrus Industry.

Hernandez, M. E. (2006). *Semilla de limón mexicano (Citrus aurantifolia): Obtención de concentrado de fibra dietética con poder antioxidante.*

Huera, C. (2006). Determinacion de las caracteristicas físicas y quimicas del limón sutil (Citrus aurantifolia Swingle). Facultad de ingeniería en ciencias agropecuarias y ambientales.

Insituto de Desarrollo Productivo de Tucumán. (2020). Sector Citrícola en Tucumán.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. *Waste*.

Iriondo-DeHond, M. M. (2018). Food Byproducts as Sustainable Ingredients for Innovative and Healthy Dairy Foods. En *Nutrients* (pág. 10). Nutrients.

Luzardo, S. B. (2021). Effect of Fresh Citrus Pulp Supplementation on Animal Performance and Meat Quality of Feedlot Steers. *Animals*.

Magalhães, D. V.-B. (2023). Functional ingredients and additives from lemon by-products and their applications in food preservation: A review. *Foods*.

Secretaría de Política Económica – Subsecretaría de Programación Microeconómica. (2018). *Informes de Cadenas de Valor: Limón.* Ministerio de Hacienda.

Shweta Suri, A. S. (2021). Recent advances in valorization of citrus fruits processing waste:. The Korean Society of Food Science and Technology 2021.

Sota, A. M. (2019). La industria citrícola de Tucumán. Una propuesta de costos y beneficios sociales. En *Costos y Gestión - Año XXIX - N.º 96* (págs. 36-73).

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2016). Solid waste management and greenhouse gases: A life-cycle assessment of emissions and sinks. *Office of Resource Conservation and Recovery.*

# “MEDICIÓN DE VARIABLES EN UN DISPOSITIVO ADMINISTRADOR DE UN DISPENSADOR DE AGUA”

Agostino, Nicolás E.; García, Federico; Miquel, Guillermo L.

*Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas, Universidad Nacional de La Matanza.*

*San Justo, Buenos Aires, Argentina*

*nagostino@alumno.unlam.edu.ar*

**RESUMEN**

En el marco del trabajo presentado en 2023 – (DISPOSITIVO DE CONTROL PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN DISPENSERS DE AGUA FRÍO-CALOR EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA MATANZA (UNLAM)) - y pensando en ampliar las características del dispositivo, decidimos continuar con las mejoras de software y hardware conducentes a, por un lado, facilitar la programación de eventos y por el otro, aumentar las capacidades del mismo incorporando a la unidad, la medición de las variables básicas que permiten calcular el consumo energético, como son la tensión y la corriente.

Este trabajo se enfoca, particularmente, en la medición de estas variables y su posterior tratamiento y presentación. En él también se describen los desafíos y resultados obtenidos, con vistas a producir un desarrollo independiente en el área de eficiencia energética y lograr la capacitación de los alumnos de la carrera de Ingeniería Electrónica centrada en la conservación de los recursos naturales y el cuidado del medio ambiente.

En una etapa posterior, que no forma parte de este trabajo, se detalla cómo se publica esta información en el servidor de la Universidad para que, de esta manera, esté disponible para futuros trabajos de investigación.

**Palabras Claves:** EFICIENCIA ENERGETICA, ADMINISTRACIÓN, MEDICIÓN.

**ABSTRACT**

Within the framework of the work presented in 2023 - (CONTROL DEVICE FOR ENERGY EFFICIENCY IN HOT-COLD WATER DISPENSERS AT THE NATIONAL UNIVERSITY OF LA MATANZA (UNLAM)) - and thinking about expanding the device's features, we decided to continue with software and hardware improvements aimed at, on the one hand, facilitating event programming and, on the other hand, increasing its capabilities by incorporating the measurement of basic energy consumption variables, such as voltage and current, into the unit.

This work focuses particularly on the measurement of these variables and their subsequent processing and presentation. It also describes the challenges and results obtained, with a view to producing an independent development in the area of energy efficiency and achieving the training of students in the Electronic Engineering program focused on the conservation of natural resources and environmental care.

In a later stage, which is not part of this work, it will detail how this information is published on the University's server so that, in this way, it is available for future research work.

**Keywords:** ENERGY EFFICIENCY, ADMINISTRATION, MEASUREMENT.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Para esta etapa del proyecto de investigación, se partió del dispositivo desarrollado en 2023 y mejorado en 2024, que permitía activar y desactivar un dispensador de agua fría-caliente, siguiendo un programa diario que solo podía modificarse a través de la conexión física de un dispositivo portátil, como una notebook o una tablet.

Hasta ese momento, todas las mediciones de consumo de energía que formaban parte del estudio se habían realizado con un medidor de energía comercial que brindaba toda la información necesaria: tensión instantánea, corriente instantánea, potencia instantánea, coseno φ y energía acumulada desde el último reset. Si bien utilizar un dispositivo comercial fue una solución práctica al comienzo de la investigación, al realizar las mediciones sobre un único dispensador bajo análisis, se advirtió que, para extender el alcance a todos los dispositivos instalados y evaluar resultados antes y después de la intervención, sería necesario instalar dos equipos en cada dispensador: uno exclusivo para medición y otro para administrar su funcionamiento.

Por lo expresado en el párrafo anterior, durante el año 2024 se decidió incorporar al dispositivo inicial la capacidad de medir la tensión de alimentación y la corriente de consumo, calcular la potencia instantánea, el cos φ y almacenar la energía consumida. Esta mejora brindaría, en una única unidad, la posibilidad de recabar información de campo y, al mismo tiempo, realizar acciones de corrección.

También se avanzó en la gestión del almacenamiento de datos mediante el acceso a la red Wi-Fi de la Universidad y la obtención de un espacio en su servidor para alojar la información publicada por uno o varios dispositivos de prueba. Esto significó un gran avance, al eliminar la limitación de espacio para almacenar la gran cantidad de datos generados.

Como gran diferencia con el prototipo desarrollado previamente, este nuevo diseño debía incluir la capacidad de medir la tensión de línea y la corriente de consumo para luego realizar los cálculos correspondientes para obtener el cos φ, la potencia activa y la energía consumida. Para ello debíamos desarrollar el método más adecuado para realizar las mediciones de tensión y de corriente.

Como línea de base, se postuló que esta nueva versión cumpliera con los siguientes requisitos:

- Ser ejecutada íntegramente en la Universidad.
- Incluir elementos de fácil adquisición en el mercado local.
- Ser compatible con el software desarrollado anteriormente.
- Contar con la participación de alumnos, docentes e investigadores de la Universidad.
- Asegurar la familiaridad de los alumnos con el hardware y software utilizados.

En este artículo se describe el proceso de integración de las capacidades de medición al dispositivo de control, basándose en fundamentos teóricos, con el fin de establecer una solución compacta, autónoma y adaptable al entorno universitario.

## 2. DESARROLLO.

La elección del microcontrolador recayó en una placa de desarrollo basada en el módulo ESP32-WROOM-32 (Espressif Systems, 2023), encargada del procesamiento de las señales analógicas provistas por los sensores de tensión y corriente. Esta elección se justifica por la gran cantidad de prestaciones que ofrece a un costo accesible y con amplia disponibilidad en el mercado. La placa cuenta con antena Wi-Fi incorporada, necesaria para la conexión a la red y el posterior envío de datos, además de una velocidad de procesamiento más que adecuada para realizar los cálculos requeridos. Se trata, además, de una plataforma ampliamente utilizada por la comunidad de desarrolladores, lo que asegura la existencia de múltiples bibliotecas disponibles que facilitan la implementación de proyectos como el presente.

Se optó por utilizar un algoritmo ya desarrollado en una de estas bibliotecas, basado en el análisis de las señales analógicas de tensión y corriente provistas por los sensores, los cuales se describen en los siguientes apartados. Este algoritmo realiza un muestreo durante un periodo completo de cada señal, y mediante cálculos, permite inferir los valores de potencia aparente, potencia activa, cos φ y energía consumida.

## 2.1. Marco Teórico.

Si tenemos una variación arbitraria de potencia en función del tiempo, como se muestra en la Figura 1, es necesario establecer un método para su análisis y cuantificación.

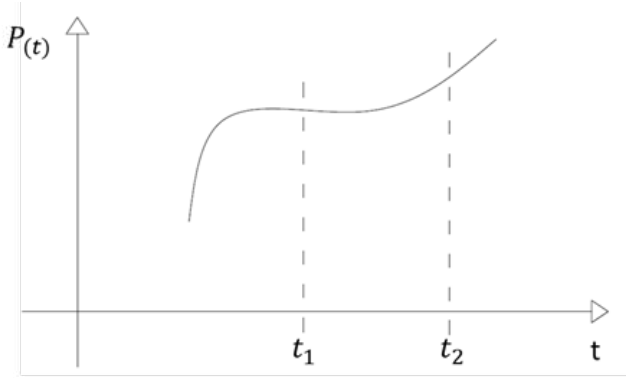



*Figura 1 Variación arbitraria de la potencia en función del tiempo (Elaboración Propia)*

Si la potencia instantánea $P(t) = V(t) \times I(t)$ es una función arbitraria del tiempo, entonces la energía transferida en el intervalo $t_1$ a $t_2$, puede calcularse como:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t)\, dt \qquad (1)$$

Esta energía se expresa en Joules (J). Si se promedia la energía transferida en el intervalo $t_1$ a $t_2$, se obtiene lo que se conoce como potencia media, también denominada potencia activa o real:

$$P = \frac{1}{(t_1 - t_2)} \int_{t_1}^{t_2} P(t)\, dt \qquad (2)$$

En nuestro caso, la señal es periódica, con período T, por lo que se puede expresar como:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} P(t)\, dt \qquad (3)$$

El problema que se presentó fue la definición del instante $t_0$ y la medición del período, utilizando el sensor que se describe a continuación.

Se propuso adoptar un valor fijo de tensión en la señal analógica provista por el sensor, y contar dos repeticiones sucesivas de dicho valor para definir un período de la señal (Figura 2). En un trabajo futuro se demostrará que este método válido únicamente para para señales sin contenido armónico.

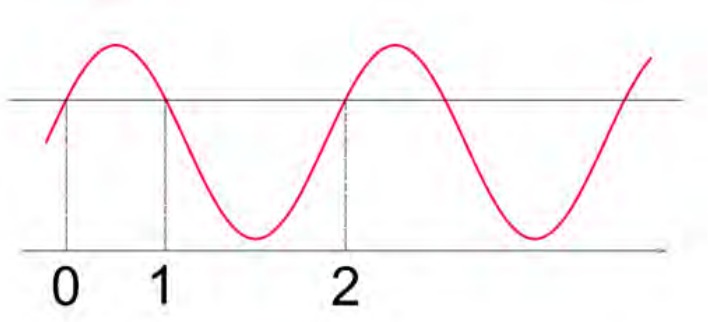



*Figura 2 Cruces de señal por valor fijo de tensión (Elaboración Propia)*

Utilizando los valores instantáneos de las señales de tensión y corriente, es posible calcular los valores eficaces de ambas magnitudes, así como la potencia instantánea.

Como se explicó previamente, al obtener la potencia instantánea se puede calcular la potencia activa, integrando dicha función dentro de un período de la señal senoidal y dividiendo el resultado por la duración del período.

Por otro lado, la potencia aparente puede calcularse como el producto entre la tensión y la corriente eficaces.

Dado que el sistema opera en régimen senoidal permanente, se puede aplicar la relación que surge del análisis del triángulo de potencias (Figura 3), en el cual:

Ps = Potencia Aparente

Pa = Potencia Activa

Pq = Potencia Reactiva

φ = Ángulo de Fase

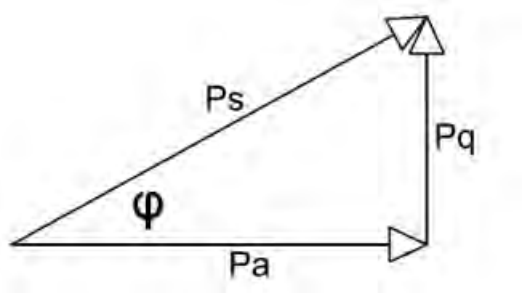



*Figura 3 Triángulo de potencias (Elaboración Propia)*

Se puede obtener el factor de potencia como:

$$F.P = cos\varphi = \frac{P_a}{P_s} \quad (4)$$

Por otro lado, la energía consumida puede calcularse a partir de la acumulación de los valores de potencia aparente en un intervalo de tiempo determinado.

Dicho intervalo comienza en el momento de encendido del dispositivo y puede ser reiniciado manualmente por el investigador responsable, permitiendo así establecer puntos de referencia para diferentes períodos de análisis.

### 2.2. Medición de Tensión.

Para la medición de la tensión de línea se seleccionó, en una primera etapa, un módulo sensor estándar ZMPT101B (Micro-Transformer). Este dispositivo permite medir tensiones monofásicas de red domiciliaria, las cuales no pueden ser aplicadas directamente a la entrada de un microcontrolador o placa de desarrollo.

El módulo ZMPT101B resuelve este inconveniente reduciendo el valor de la tensión de entrada a un nivel más bajo, adecuado para ser leído por un conversor analógico-digital (ADC), y lo hace mediante un circuito que proporciona aislamiento galvánico. La Figura 2 ilustra el principio de funcionamiento.

El módulo está conformado por un transformador de tensión que realiza tanto la adecuación de la magnitud de la señal como el aislamiento eléctrico, mejorando la seguridad operativa. El primario del transformador se conecta directamente a la red eléctrica, mientras que en el secundario se incorpora un divisor resistivo y un circuito basado en un amplificador operacional LM358. Este último introduce un desplazamiento de continua (offset) necesario para desplazar toda la señal al rango positivo.

La amplitud de la señal de salida puede ajustarse mediante un potenciómetro incorporado en el módulo. El nivel del desplazamiento depende de la tensión de alimentación: si el módulo se alimenta con 5 V, el offset será de 2,5 V; si se alimenta con 3,3 V, el offset será de 1,65 V. De esta manera, se obtiene

una señal completamente positiva, con valor medio distinto de cero, tal como se muestra en la Figura 2.

Esta señal analógica es leída por una entrada ADC del microcontrolador, y posteriormente, procesada por un algoritmo que permite obtener su valor eficaz.

### 2.2.1 Funcionamiento del sensor ZMPT101B y características técnicas.

El siguiente es un resumen de las características del módulo de sensado de tensión de línea (Micro-Transformer):

- Tensión de Alimentación: 3,3 – 5 VDC
- Tensión AC de Entrada: 250 VAC máx.
- Tensión AC de Salida: Senoidal 5 VAC máx.
- Señal de Salida: Analógica Senoidal
- Corriente Nominal de Entrada/Salida: 2 mA
- Ratio Entrada/Salida 1000:1000
- Diferencia de Fase: < 30º (a 50 ohm)
- Rango Lineal: 0 – 3 mA (a 50 ohm)
- Linealidad: 1%
- Precisión: 0,2%
- Aislamiento eléctrico: hasta 3000 V
- Dimensiones: 49,5 x 19,4 x 23,2 mm

Tal como se explicó en el apartado anterior, el módulo ZMPT101B utiliza un transformador para reducir la tensión de red a un valor apto para el microcontrolador, con aislamiento galvánico. La señal obtenida pasa por una etapa de acondicionamiento basada en dos amplificadores operacionales (Figura 4), que permiten amplificar y desplazar la señal a un nivel compatible con una entrada ADC. La amplitud puede ajustarse mediante un potenciómetro incorporado en el módulo.

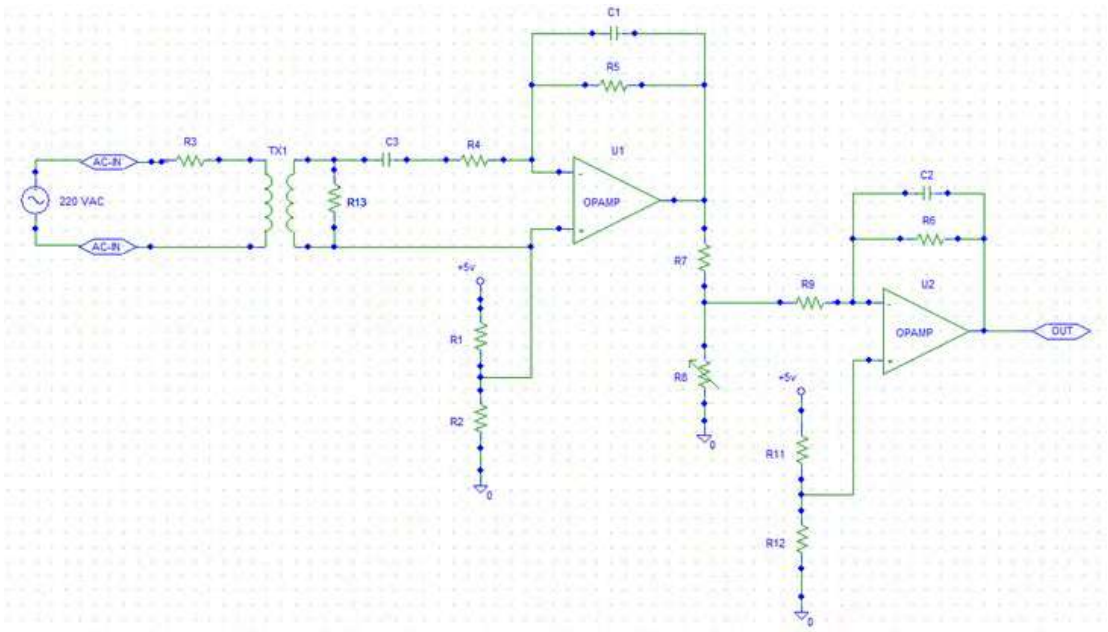



*Figura 4 Diagrama del sensor de tensión ZMPT101B (Elaboración Propia)*

En la Figura 5 se visualiza el aspecto físico del módulo a utilizar, el cual contiene el ZMPT101B, el potenciómetro regulable, entre otras cosas.



*Figura 5 Módulo sensor de tensión basado en el ZMPT101B*

### 2.3. Medición de Corriente.

Pensando en uso más amplio que el simple control y monitoreo de un dispensador de agua, inicialmente se optó por un sensor de corriente ACS712 de 30 A (Allegro Microsystems, 2024). Esta elección permite medir, con holgura, un consumo de hasta 10 $A_{rms}$ en corriente alterna.

Sin embargo, dado que el consumo eléctrico máximo del dispositivo de prueba no supera los 2 $A_{rms}$, surge un problema de sensibilidad en la lectura y un empobrecimiento de la relación señal-ruido.

Considerando que el ADC del microcontrolador elegido dispone de una resolución de 12 bits, implica que es capaz de discriminar 4096 estados. Este valor es fijo más allá del rango de medición del sensor de corriente. Es evidente que, a mayor alcance del sensor, menor será la capacidad de discriminación de pequeñas variaciones de corriente.

Otro aspecto interesante es que el sensor entrega una señal analógica comprendida entre 0 y 5 V para una excursión de la corriente sensada comprendida entre -30 A y +30 A, asignando el valor de tensión de salida de 2,5 V para el valor de corriente cero. El gráfico presentado en la Figura 6 ilustra esta situación, reflejando claramente cómo empeora la resolución de corriente con el aumento del alcance del sensor.

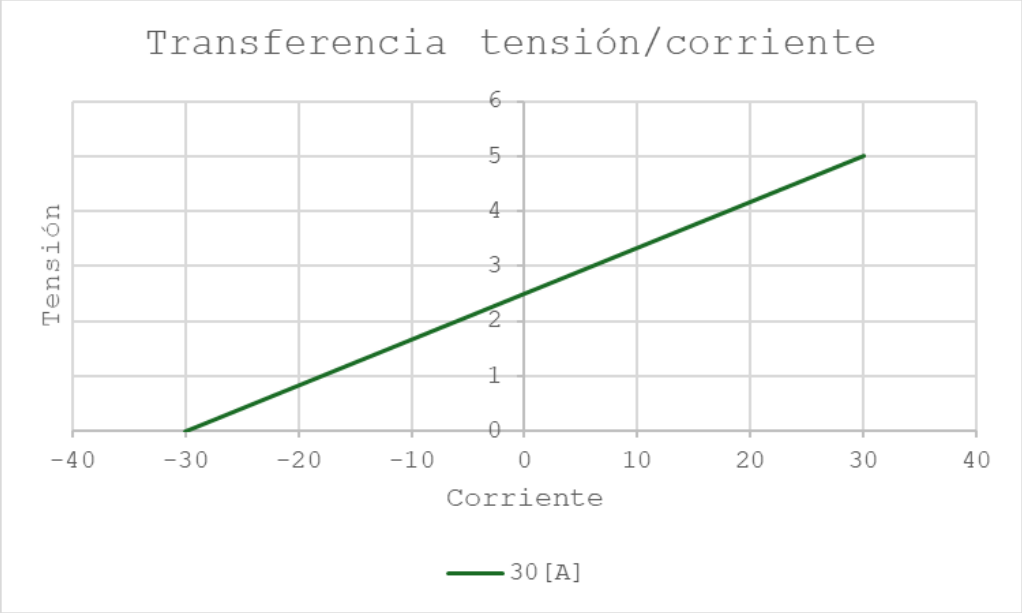



*Figura 6 Transferencia corriente/tensión de los sensores (Elaboración Propia)*

### 2.3.1 Funcionamiento del sensor ACS712 y características técnicas.

El sensor de corriente utilizado inicialmente reúne las siguientes características técnicas:

- Rango de medición: ±30 A
- Error típico: 1,5 % a 25 °C
- Tensión de alimentación: 5 V
- Aislación eléctrica: 2,1 kV entre entrada y salida
- Sensibilidad: 66 mV/A
- Salida analógica proporcional a la corriente medida

En la Figura 7 se encuentra el diagrama interno que provee el fabricante del sensor. Por su parte, en la Figura 8 se presenta el aspecto físico del módulo utilizado en el dispositivo.

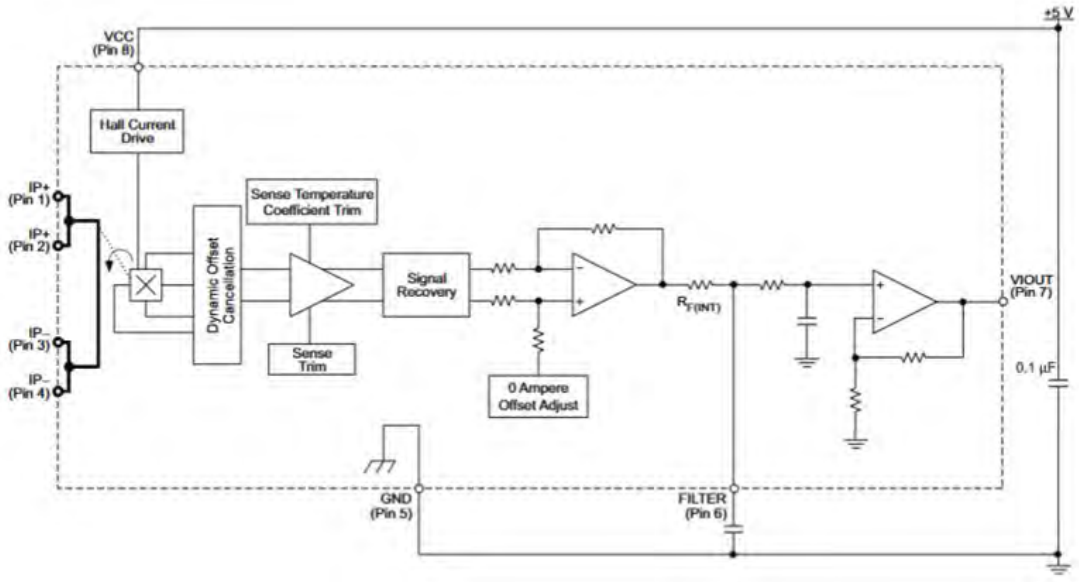



*Figura 7 Diagrama del sensor de Corriente (Allegro Microsystems, 2024)*



*Figura 8 Módulo sensor de corriente basado en el ACS712*

### 3. CONCLUSIONES.

Se demuestra que, utilizando elementos simples y realizando mediciones que no revisten complejidad, es posible obtener los valores eléctricos de interés para esta investigación. Esto confirma que, con recursos accesibles y un diseño adecuado, se pueden llevar a cabo monitoreos efectivos sin necesidad de equipamiento sofisticado ni costoso.

Este resultado valida la viabilidad de implementar sistemas de monitoreo energético accesibles y de bajo costo, que facilitan el análisis del consumo y la eficiencia energética en la Universidad. Asimismo, el desarrollo del dispositivo sienta las bases para futuras mejoras en el control y la administración energética, promoviendo un uso más eficiente de los recursos en el ámbito institucional.

## 4. FUTURAS MEJORAS.

Es necesario seguir trabajando en mejorar las mediciones de corriente, dado que se utilizó un sensor de rango muy superior al necesario para esta aplicación específica, lo que puede afectar la precisión de los resultados.

También se identificó una sensibilidad considerable en las lecturas de los sensores de corriente ante variaciones en la tensión de alimentación, por lo que resulta imprescindible optimizar el diseño de las fuentes de alimentación para garantizar una mayor estabilidad y precisión en las mediciones.

Finalmente, se continuará desarrollando y perfeccionando los algoritmos de procesamiento de señales de tensión y corriente, con el fin de minimizar los efectos adversos provocados por el contenido armónico presente en las señales eléctricas, mejorando así la fiabilidad y exactitud de las mediciones obtenidas.

## 5. REFERENCIAS.


Allegro Microsystems. (2024). *Allegro MicroSystems Official Website*. Obtenido de ACS712 – Fully integrated, Hall-effect current sensor IC datasheet: https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx

Espressif Systems. (2023). *Espressif.* Obtenido de ESP32-WROOM-32 Datasheet: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf

Micro-Transformer. (s.f.). *Micro-Transformer Official Website.* Obtenido de ZMPT101B Voltage Transformer Datasheet: https://5krorwxhmqqirik.leadongcdn.com/ZMPT101B+specification-aidijBqoKomRilSqqokpjkp.pdf

# ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS DE FABRICACIÓN DE ESPUMAS DE ALUMINIO PARA NÚCLEOS DE MATERIALES SANDWICH APLICABLES A ESTRUCTURAS DEFORMABLES VEHICULARES

Potenzoni Landa, Chiara; Cruz Villegas, Liz; Micone, Nahuel

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora.*
*chpotenzoni@gmail.com ; cruzvillegasliz@gmail.com ; nahuelmicone@yahoo.com.ar*

**RESUMEN**

La industria automotriz se encuentra en constante desarrollo tecnológico, principalmente en aspectos relacionados con la reducción de peso, disminución de consumo de combustible, mitigación de emisiones contaminantes y el incremento de la seguridad de los ocupantes. Con tal fin, su foco se encuentra en el diseño y desarrollo de materiales específicos, siendo los principales requerimientos la baja densidad y alta capacidad de deformación. En este contexto, el presente trabajo analiza el estado actual de los materiales utilizados en estructuras deformables vehiculares y analiza las metodologías actuales de fabricación de espumas de aluminio para su uso como núcleos en estructuras tipo sándwich aplicables a zonas deformables vehiculares. Se propone una metodología de fabricación de espuma de aluminio, basada en el espumado de metal fundido mediante la adición de espumante ($TiH_2$) y espesante ($CaCO_3$ o $Al_2O_3$), y posterior laminado en caliente a fin de obtener un material con gran capacidad de absorción de energía en comparación con las soluciones convencionales utilizadas en zonas de impacto vehicular. Los resultados esperados indican la obtención de una espuma de aluminio de poro cerrado con diámetros entre 0,1 y 3 mm y porosidad de 40–80%, que permitiría reducir significativamente el peso y aumentar la eficiencia energética en componentes estructurales. Se concluye que la estructura tipo sándwich con núcleo de espuma metálica constituye una alternativa viable y sustentable frente a los materiales convencionales utilizados en autopartes.

**Palabras Claves:** Estructura tipo sándwich, Espuma de Aluminio, Industria automotriz, Autopartes.

**ABSTRACT**

The automotive industry is undergoing constant technological development, mainly in aspects related to weight reduction, decreased fuel consumption, mitigation of pollutant emissions, and increased occupant safety. To this end, its focus lies on the design and development of specific materials, with low density and high deformability as the main requirements. In this context, the present work analyzes the current state of materials used in deformable vehicle structures and examines current manufacturing methodologies for aluminum foams to be used as cores in sandwich-type structures applicable to deformable vehicle zones. A manufacturing methodology for aluminum foam is proposed, based on molten metal foaming through the addition of a foaming agent ($TiH_2$) and a thickener ($CaCO_3$ or $Al_2O_3$), followed by hot rolling, in order to obtain a material with high energy absorption capacity compared to conventional solutions used in vehicle impact zones. The expected results indicate the production of closed-cell aluminum foam with pore diameters between 0.1 and 3 mm and porosity ranging from 40 to 80%, which would significantly reduce weight and increase energy efficiency in structural components. It is concluded that sandwich structures with metallic foam cores represent a viable and sustainable alternative to conventional materials used in automotive components.

**Keywords:** Sandwich structure, Aluminum foam, Automotive industry, Auto parts.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos, la creciente conciencia ambiental y las nuevas demandas de los consumidores están transformando el panorama de la Industria Automotriz. Esta se encuentra a la vanguardia en términos de innovación y desarrollo, manteniendo el foco fundamentalmente en la seguridad de los pasajeros y el cumplimiento de regulaciones y normativas asociadas a la minimización de emisiones (Pichler et al., 2020). Actualmente se encuentran vigentes el tratado de La Asamblea de la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015) para el Medio Ambiente, el Protocolo de Kioto, el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Cruz et al., 2021). La industria automotriz, debido a su impacto global en emisiones, está directamente relacionada con los ODS 3 (Salud y Bienestar), 7 (Energía Asequible y No Contaminante), 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y 13 (Acción por el Clima). A partir de lo expuesto, surge la necesidad de desarrollar materiales avanzados que respondan tanto a las exigencias propias de la industria automotriz como a los compromisos establecidos en los tratados y acuerdos internacionales mencionados, así como la importancia de contar con la capacidad local para procesarlos. Por este motivo, las compañías automotrices investigan y prueban nuevos materiales con el objetivo de fabricar vehículos más resistentes, seguros y sostenibles, incorporando opciones ecológicas que transforman el diseño y la construcción de los automóviles (Taub et al., 2019). En este contexto, el análisis realizado se centra en un conjunto específico de piezas automotrices que desempeñan un papel clave en términos de: seguridad, reducción de peso y disminución de emisiones. La idea que une estos conceptos es que cuanto más liviano sea el vehículo, menor será la energía que deberá disiparse en caso de una colisión. Adicionalmente, menor será el consumo de combustible. Ambos aspectos contribuyen a que el automóvil sea más ecológico y seguro (Garzón, 2023).

Ante un impacto, las partes del vehículo que primero hacen contacto son denominadas zonas de deformación programada, las cuales deben deformarse, comprimirse o romperse para absorber la energía liberada en la colisión y lograr que la detención no sea repentina, sino progresiva. De esta forma no se transmiten cargas extremas a la cabina y los ocupantes experimentan una desaceleración menor (Peng et al., 2024). Típicamente, estas partes se fabrican de aleaciones de acero o aluminio, por ejemplo, para que se deformen de manera controlada, absorbiendo la energía del impacto.

De los principales puntos de contacto primario, el que mayor probabilidad de hacer contacto es el paragolpes delantero del vehículo, ya que las colisiones frontales son las más frecuentes (Australasian New Car Assessment Program [ANCAP], s.f.). Este componente actúa como una barrera inicial, permitiendo el correcto despliegue de los airbags. Además, los elementos de la zona delantera (ver figura 1) desempeñan un papel clave en la absorción de energía durante el impacto (Du et al., 2023), especialmente la viga del paragolpes y la caja de impactos.

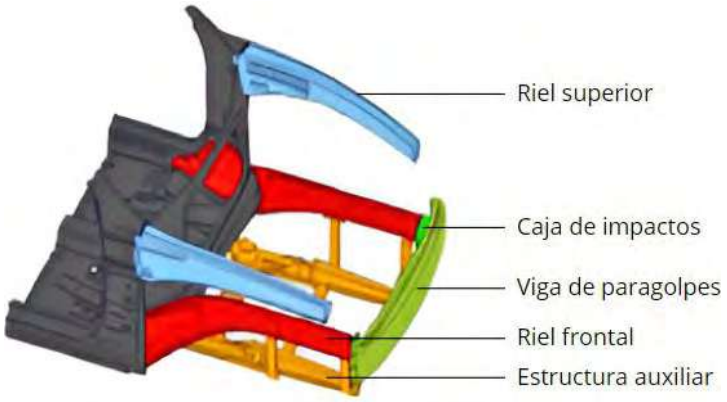



*Figura 1 Componentes de la zona delantera del vehículo (Du et al., 2023).*

Estas piezas están hechas en la mayoría de los casos de acero debido a su alta resistencia y bajo costo de producción, pero poseen una densidad (y por lo tanto un peso) relevante, como se puede observar en la siguiente tabla.

*Tabla 1 Comparación de materiales actuales empleados en vigas y cajas de impacto (Du et al., 2023).*

| Materiales | Densidad [g/cm³] | Módulo de Young [GPa] | Relación de Poisson [v] | Esfuerzo de flexión [MPa] | Módulo de flexión [GPa] | Esfuerzo de tracción [MPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Acero convencional | 7,8 - 8,0 | 200 -210 | 0,27 - 0,30 | 250 - 500 | 200 - 210 | 200 - 500 |
| Acero de alta resistencia | 7,8 - 8,0 | 210 - 300 | 0,27 - 0,30 | 500 - 1500 | 200 - 300 | 500 - 1500 |
| Aleaciones de aluminio | 2,7 - 2,9 | 60 - 80 | 0,3 - 0,4 | 200 - 500 | 70 - 80 | 200 - 500 |

En rigor, las vigas suelen fabricarse principalmente de acero de alta resistencia, mientras que las cajas de impacto de aleaciones de aluminio, las que intrínsecamente tienden a tener mayor capacidad de absorción de energía (Du et al., 2023).

Por su parte, los aceros de alta resistencia se caracterizan por su alta capacidad mecánica y bajo peso relativo. Esto les permite soportar cargas significativas con menor cantidad de material, lo que resulta en una reducción del peso total del componente o estructura (Du et al., 2023). Sin embargo, su uso no se ha implementado a gran escala debido a su limitada capacidad de deformación (Forni et al., 2023). Es por esto que los materiales compuestos están en pleno auge de desarrollo. Entre ellos, aquellos que incluyen fibra de carbono (CFRP), Fibra reforzada con polímero (FRP), Kevlar, estructuras sándwich con núcleo de espumas de aluminio (AFS) (Koukal & Macha, 2021). Estos materiales, que combinan dos o más componentes con propiedades complementarias ofrecen soluciones innovadoras que superan muchas de las limitaciones de los metales tradicionales, marcando así una nueva etapa en el diseño y fabricación de estructuras avanzadas.

### 1.1. Materiales compuestos en la industria automotriz.

En los últimos años, los materiales compuestos han cobrado un papel protagónico en distintas áreas de la ingeniería, especialmente en la industria automotriz, donde juega un papel muy importante la relación entre resistencia mecánica y peso (Spasenović & Blagojević, 2021). Su capacidad para adaptarse a diferentes requerimientos mediante la combinación de materiales con propiedades específicas los convierte en candidatos ideales para aplicaciones estructurales y de absorción de impacto. Esta versatilidad permite no solo optimizar el rendimiento mecánico de los componentes, sino también reducir el consumo energético y las emisiones asociadas al transporte.

En determinadas aplicaciones automotrices se utilizan espumas plásticas como materiales absorbedores de energía, debido a su baja densidad y capacidad de deformación. No obstante, su baja rigidez mecánica y la dificultad para su reciclado limitan su empleo en componentes estructurales o en contextos que requieren mayor exigencia funcional (Tomin & Kmetty, 2021).

Específicamente en elementos absorbedores de energía, los materiales compuestos pueden reducir el peso del paragolpes en un 4,84% y aumentar la absorción de energía en 1,36 veces en comparación con el acero (Zeng et al., 2016). Dentro de esta familia de materiales compuestos, las espumas metálicas, como las de aluminio, están siendo estudiadas por su bajo peso y buena capacidad de absorción de energía (Zewdie et al., 2024).

Por otro lado, encontraron que las vigas de paragolpes rellenas con espumas de aluminio mejoran significativamente la absorción de energía y la amortiguación, con un aumento marginal en el peso (Li et al., 2017). Esto se demuestra en la figura 2 a través de las curvas de absorción de energía (E) de la viga de paragolpes (Figura 2a) y la caja de impacto (Figura 2b) rellenos de espuma. Este fenómeno se representa mediante las áreas sombreadas, que ilustran la interacción entre los componentes. En el caso de la viga (Figura 2a), el área bajo la curva corresponde a la energía absorbida gracias a la espuma, cuyo comportamiento progresivo y deformable complementa la alta rigidez inicial de la estructura metálica. Esta sinergia permite una disipación de energía más eficiente durante el impacto. Por otra parte, en la caja de impacto, el efecto es más notable (Figura 2b). Al tratarse de una

estructura más flexible, la incorporación del núcleo de espuma incrementa de forma significativa la resistencia global del sistema, generando una mayor pendiente en la curva de absorción de energía.

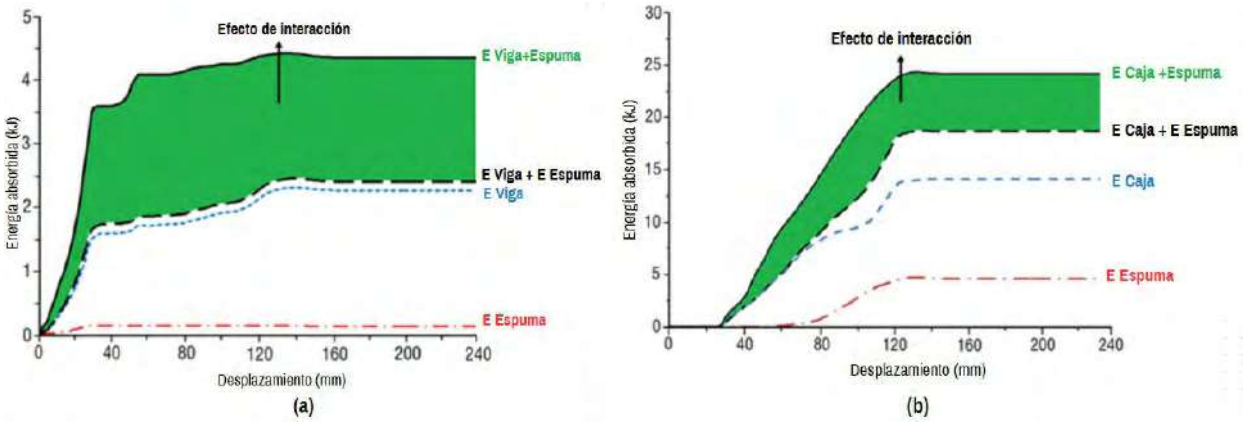



*Figura 2 Efecto de interacción en la absorción de energía en estructuras rellenas de espuma: (a) viga de paragolpes relleno de espuma y (b) caja de impacto rellena de espuma (Li et al., 2017).*

La espuma de aluminio se destaca por su capacidad para absorber energía con mayores deformaciones a menores niveles de tensión (Nava et al., 2017), aunque su rigidez y resistencia son limitadas comparadas con materiales más densos. Estas limitaciones subrayan la importancia de explorar enfoques alternativos. Una manera efectiva de mejorar dichas propiedades es combinar dicho núcleo con dos láminas exteriores, proporcionando flexibilidad y resistencia, maximizando la absorción de energía y manteniendo un bajo peso en comparación con una pieza maciza. Esta estructura es conocida como tipo “sándwich”.

### 1.2. Estructura tipo Sándwich.

Frente a las limitaciones de los materiales tradicionales en términos de resistencia y peso, surge la necesidad de soluciones estructurales más eficientes. Una de ellas es la estructura tipo “sándwich”, que representa una alternativa ingeniosa para optimizar el rendimiento mecánico sin aumentar significativamente la masa. Como se muestra en la Figura 3, esta estructura consta de dos láminas delgadas unidas por un núcleo de mayor espesor y bajo peso, creando un material superior que se adapta mejor a requisitos específicos.

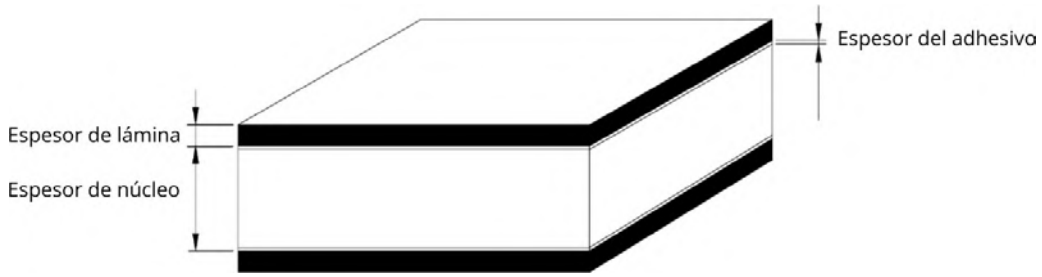



*Figura 3 Composición de estructura tipo sándwich.*

Entre los diferentes núcleos, el tipo Honeycomb compuesto por celdas hexagonales destaca entre los otros (espumas, materiales corrugados, fibras textiles y madera), ya que las mismas se comportan como amortiguadores de energía y proporcionan una ventaja distintiva con respecto a otros materiales de amortiguación. Esto es así gracias a su geometría hexagonal, que les permite una mejor distribución de las cargas, una mayor ligereza y una mejor resistencia a la fatiga (Ghimire et al., 2024). Sin embargo, su fabricación es más costosa debido a la complejidad de su proceso productivo y los materiales especializados requeridos para su obtención. Para dar un ejemplo de aplicación, Hexcel (Hexcel Composites, 2000) diseñó una camioneta con paneles de aluminio tipo Honeycomb, que pesaba 3629 kg, un 37,5% menos que otras camionetas similares. Sin embargo, su alto costo impidió su fabricación a gran escala. Además, estas estructuras, ante un impacto, enfrentan problemas como aplastamiento del núcleo, fallas por pandeo y delaminación (separación entre el

núcleo y las láminas) (Girolamo et al., 2018) (ver figura 4), lo que ha impulsado la búsqueda de soluciones alternativas.

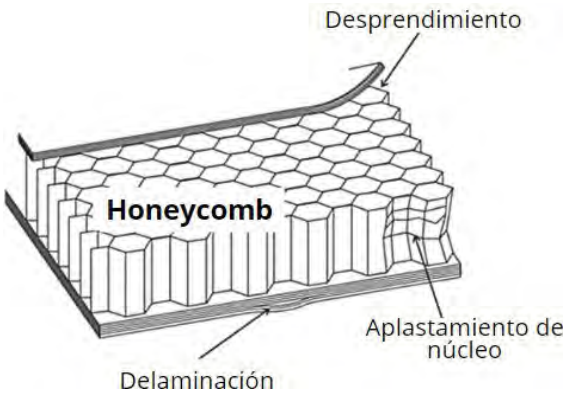



*Figura 4 Modos de falla de una estructura con núcleo Honeycomb (Girolamo et al., 2018).*

A raíz de esto, la estructura sándwich con núcleo de espuma metálica (AFS) (ver figura 5) se propone como opción ideal para el núcleo de estructuras sándwich debido a su baja densidad, buena relación resistencia/peso, y excelente capacidad de absorción de energía.



*Figura 5 Estructura sándwich con núcleo de espuma de aluminio (Sharma et al., 2022).*

Las espumas metálicas son materiales altamente porosos con una estructura compuesta por poros llenos de gas, que ocupan entre el 50 al 90% del volumen total. Estas pueden clasificarse en espumas de aluminio de poro cerrado y poro abierto. La espuma de poro o celda cerrada se presenta como la opción más adecuada para esta aplicación, debido a que su estructura ligera confiere una densidad más baja en comparación con la espuma de celda abierta (Banhart et al., 2001)(Nisa et al., 2022), a la vez ofrece una rigidez más apropiada. Además, el proceso de fabricación de la espuma de celda cerrada es más simple y eficiente, lo que resulta en menores costes de producción (Hai & Zhengbin, 2014). Otro factor a considerar es la mejor adherencia a los paneles exteriores que se obtiene al utilizar espuma de celda cerrada en el núcleo, lo que mejora la interacción con las láminas y asegura una mayor cohesión en la estructura final (Pichler et al., 2020). Finalmente, la falta de ensayos y aplicaciones probadas para espumas de celda abierta en este tipo de contextos refuerza la viabilidad del uso de espumas de celda cerrada. En dicho caso, los poros son esféricos y cerrados, y la densidad de estas espumas varía típicamente entre 0,4 y 0,8 g/cm³ (Konstantinidis et al., 2009). Este valor es fundamental para determinar sus propiedades mecánicas y su capacidad de absorción de energía. Un control y ajuste de la densidad permite optimizar las espumas para aplicaciones específicas, mejorando su rendimiento en términos de resistencia, rigidez y absorción de impactos. Este control está íntimamente ligado al proceso de fabricación, que determina la distribución y el tamaño de los poros dentro de la espuma. Por lo tanto, una adecuada selección del proceso de fabricación es fundamental para obtener las propiedades deseadas y garantizar que la espuma de aluminio cumpla con las especificaciones requeridas.

### 1.3. Métodos de fabricación de espumas de aluminio.

Como se mencionó anteriormente, las propiedades finales de las estructuras sándwich dependen del tipo de núcleo, características de las láminas y de la unión de dichas partes. Con respecto al núcleo,

en la actualidad existen dos técnicas generales para espumar metales. La primera, por espumado de líquidos metálicos y la segunda utilizando un precursor metálico espumante, también identificados como espumación directa e indirecta respectivamente. Respecto a la técnica por espumado de líquidos metálicos existen tres formas de obtener espumas metálicas: 1) por inyección de un gas en el metal fundido, 2) por adición de agentes espumantes induciendo la liberación de gas in situ, y 3) por precipitación de un gas previamente disuelto. En cuanto a la técnica por precursor metálico también presenta tres formas de obtención de espumas, las cuales difieren según la preparación del precursor: 1) espumado de polvos compactos, 2) espumado por fundición tixotrópica en estado semisólido, y 3) espumado con agentes espumantes sobre metal fundido. En términos de factibilidad, los procesos con adición de espumantes son más sencillos y económicos en comparación con los procesos de polvos (Gergely & Clyne, 2000). El espumante es el encargado de generar el gas que forma los poros dentro del aluminio fundido, permitiendo la creación de la estructura celular característica de la espuma metálica. Mientras que el espesante es el responsable de aumentar la viscosidad de la mezcla, estabilizando la espuma y evitando el colapso prematuro de los poros antes de la solidificación del material (Rodinger et al., 2023).

Es de notar que la aleación seleccionada influye significativamente en la estabilidad térmica y la resistencia de la espuma, mientras que los espumantes desempeñan un papel crucial en la formación y tamaño de los poros. Las aleaciones de aluminio Al-Si son ampliamente utilizadas en la industria automotriz debido a su excelente fluidez y capacidad de colada, así como su buena resistencia a la corrosión y sus propiedades mecánicas y físicas (Ejiofor & Reddy, 1997). Por dicha razón se ha seleccionado trabajar con este tipo de aleaciones (AlSi) como base para este trabajo, utilizando $TiH_2$ como agente espumante y CaCO3 o $Al_2O_3$ como espesantes. Más detalles en cuanto a dicha selección puede verse en publicaciones previas (Matijasevic-Lux et al., 2006) (Rodinger et al., 2023) (Byakova et al., 2022) (González-Nava et al., 2018).

### 1.4. Métodos de unión lámina-núcleo.

Para las láminas del sándwich se consideran algunas de las siguientes series: 2000, 5000 y 6000. Dicha decisión se basa en el hecho de que, las mismas, poseen buena resistencia mecánica, al impacto, a la fatiga y a la corrosión. De estas series, la 6063, 6061 (Rathnaweera, 2014) han sido utilizadas y ensayadas en AFS, y la 6082 es ofrecida por la industria Metalfoam (Metalfoam, s.f.) exclusivamente para la industria automotriz. Comercialmente, el espesor de las láminas de la estructura sándwich para autopartes varía entre 0,75 y 10 mm, mientras que el espesor total del material oscila entre 9 y 80 mm (Metalfoam, s.f.). Dado que el objetivo es validar el proceso y comparar los resultados con otros desarrollos para aplicaciones similares (Neu et al., 2024), en este trabajo se empleará un espesor total de AFS de entre 8 y 15 mm, con láminas de 0,75 a 1,5 mm. La unión o adhesión es una de las cuestiones difíciles de estandarizar, y la calidad de la misma es fundamental para el éxito de la aplicación. En base a esto último, se continúan evaluando diferentes métodos de adhesión, principalmente para paneles AFS. Estos modos de unión suelen clasificarse como adhesión ex situ y adhesión in situ (Banhart & Seeliger, 2008), y también como adhesión metalúrgica y adhesión mecánica (Lin et al., 2016).

- La adhesión ex situ (ver figura 5 A) es la que se realiza posterior a la obtención de la espuma, y puede ser por unión adhesiva, soldadura o difusión.
- La adhesión in situ (ver figura 5 B,C,D) se realiza en conjunto con la espumación, es decir la unión se realiza in situ con la espuma y se puede obtener: espuma expansible entre dos láminas, espumado de tres capas y espumas integrales.
- La adhesión metalúrgica también llamada metálica puede obtenerse por laminación, soldadura, prensado en caliente, adhesión por tres capas, entre otras, y se distinguen por no utilizar adhesivos poliméricos. Poseen ventajas como la resistencia al calor, estabilidad a largo plazo, resistencia de unión, inflamabilidad, etc.
- La adhesión mecánica se obtiene con el uso de adhesivos, remaches, tornillos, etc. Este tipo de uniones se producen fácilmente a bajo costo, pero adicionan un peso, reducen la resistencia mecánica y térmica.

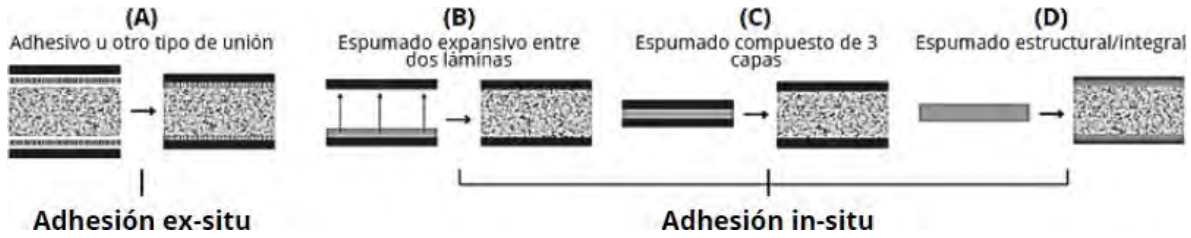



*Figura 6 Tipos de adhesión (Banhart & Seeliger, 2008).*

### 1.5. Proceso de fabricación propuesto.

Basados en los modos de adhesión existentes, la criticidad del espumado, las características macroestructurales y el potencial uso en estructuras deformables de los automóviles, el proceso de fabricación de los paneles sándwich con núcleo de espuma de aluminio óptimo y factible es mediante la espuma con precursor metálico obtenido por metal fundido y la unión mecánica por laminación.

Este proceso puede dividirse en 3 etapas:

Precursor espumable: para ello se ha seleccionado el proceso mediante adición de espumantes el cual consiste en fundir la aleación de aluminio y, posteriormente, incorporar el agente espumante y el espesante bajo condiciones controladas de agitación, temperatura y tiempo. La mezcla se realiza en un crisol dentro de un horno, y alcanzada la homogeneidad deseada, el material fundido se vierte sobre un molde refrigerado donde se solidifica y enfría hasta obtener el bloque precursor.

Sandwich del precursor: en esta etapa se realiza la unión del precursor con las láminas. En primer lugar, se une el precursor con las placas en un horno a una temperatura inferior de la espumación, para luego pasar por un laminado en caliente y así obtener el Sandwich Precursor de Aluminio (APS).

Sandwich espumado: luego de la laminación, el APS es espumado en un horno y se obtiene la AFS.

En la siguiente figura se presenta un esquema de este proceso de fabricación, el cual resume gráficamente cada una de las etapas mencionadas.

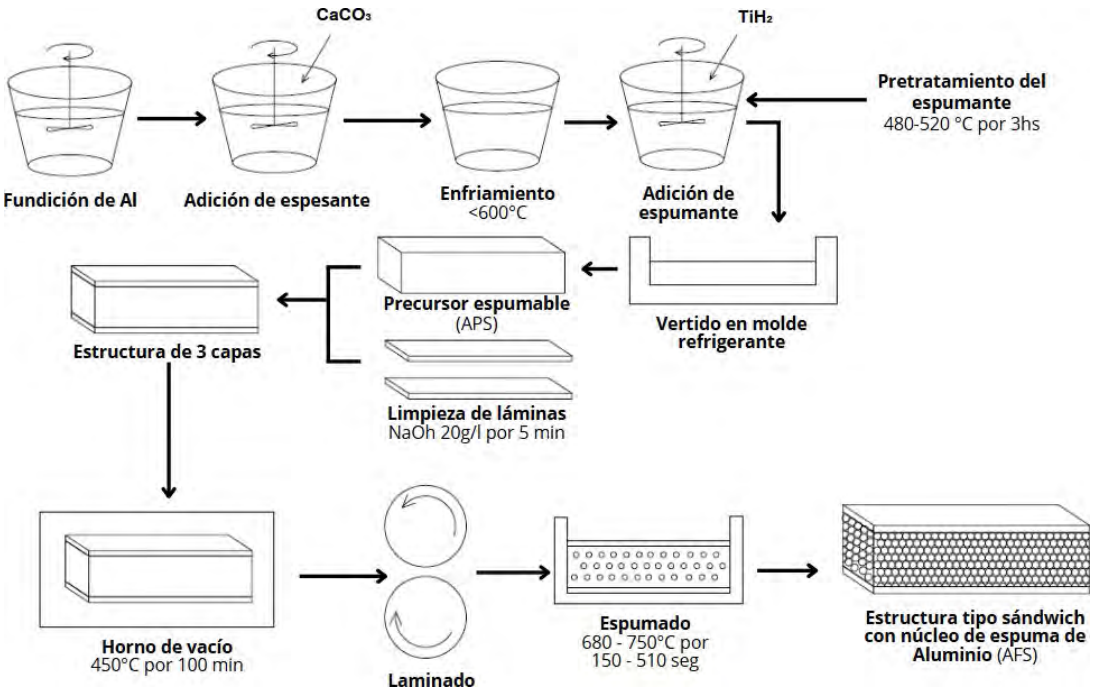



*Figura 7 Esquema del proceso de fabricación.*

A continuación, se detalla el desarrollo del esquema presentado, a fin de profundizar en cada una de las etapas del proceso.

### 1.6. Desarrollo del proceso de producción para estructuras tipo sándwich de espuma de aluminio.

Con relación al proceso de fabricación de espumas propuesto (ver Figura 7), en primer lugar se funde la aleación de aluminio AlSi bajo agitación constante a una velocidad de 600–700 rpm (Rodinger et al., 2023). Al alcanzar los 700 °C, se añade el espesante ($CaCO_3$ o $Al_2O_3$), seleccionado por su alta capacidad para estabilizar la espuma. Su uso en el tratamiento del fundido representa actualmente la única opción viable para la producción a escala comercial (Song et al., 2000). La mezcla se mantiene bajo agitación vigorosa durante 5–15 minutos, con el objetivo de incrementar su viscosidad hasta alcanzar valores comprendidos entre 5 y 8 MPa (Padron, 2023). A continuación, se enfría por debajo de los 600 °C (Padron, 2023), lo cual permite alcanzar una viscosidad suficiente para evitar la fuga de gas desde el interior de la masa en estado pastoso. Esto resulta en una estructura más homogénea (Padron, 2023).

En esta etapa, se incorpora el agente espumante, generalmente $TiH_2$ (Miyoshi et al., 2002), previamente tratado térmicamente a 480–520 °C durante 180 minutos (Matijasevic et al., 1987). Dicho tratamiento es esencial, ya que el $TiH_2$ en estado crudo presenta una temperatura de descomposición inferior a 500 °C (Baumeister et al., 1997), menor a la requerida para la espumación (>600 °C). Mediante este proceso, se incrementa su temperatura de descomposición (Matijasevic et al., 1987), mejorando significativamente la calidad de la espuma obtenida. Tras la adición del espumante, la mezcla se agita durante 2–3 minutos a una velocidad de 1.200 rpm, manteniéndose la masa fundida en el horno. En esta fase, el espumante comienza a liberar gas y se forman burbujas dentro de la aleación; sin embargo, el crecimiento significativo de la espuma se produce posteriormente durante el calentamiento del precursor. Finalmente, la mezcla se vierte en un molde refrigerado para su solidificación antes de que el hidrógeno escape o los poros colapsen o se fusionen, obteniéndose así el precursor espumable. Según el tiempo y las condiciones de producción, se alcanza un determinado porcentaje de porosidad, tamaño de poro y una piel exterior sólida (Baumeister et al., 1997).

Para lograr una buena adhesión, las láminas de aluminio deben limpiarse y pulirse hasta un grano de 800 micras, eliminando así impurezas y óxidos. Luego, se coloca el precursor a temperatura ambiente entre ambas láminas, y se calienta en un horno al vacío a 450 °C durante 100 minutos. De este modo, se obtiene el precursor con las láminas firmemente adheridas. Finalmente, para conformar el sándwich, se realiza un proceso de laminado bajo los siguientes parámetros (Lin et al., 2016):

Temperatura de laminado: $$T = 0,65 - 0,95\,T_S = 548 - 575\,°C \quad (1)$$

Tiempo de retención: $$t = 20\sqrt{T_0} = 55 - 80\,s \quad (2)$$

Tasa de reducción: $$R = \left[1 - \left(\frac{T_0}{T_N}\right)^{\frac{1}{N}}\right] * 100\% \quad (3)$$

Donde, T Ecuación (1) y TS Ecuación (2) son la temperatura de laminación y la temperatura de solidificación de la capa central ; t es el tiempo de mantenimiento a la temperatura de laminación requerida; R Ecuación (3) es la tasa de reducción, y N representa el número de pasadas de laminación; T0 y TN son el grosor de la estructura de tres capas antes (8-15 mm) y después de la laminación (N, pasadas), respectivamente. Por último, para obtener el panel sándwich con espuma de aluminio (AFS), el APS se somete a un tratamiento térmico en horno entre 680 y 750 °C durante un período de 2,5 a 8,5 minutos. En este paso ocurre la espumación, ya que el $TiH_2$ se descompone liberando gas, lo que expande el núcleo hasta formar la estructura celular deseada.

A continuación, se presenta un esquema que resume las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo la fabricación correspondientes a cada etapa del proceso.

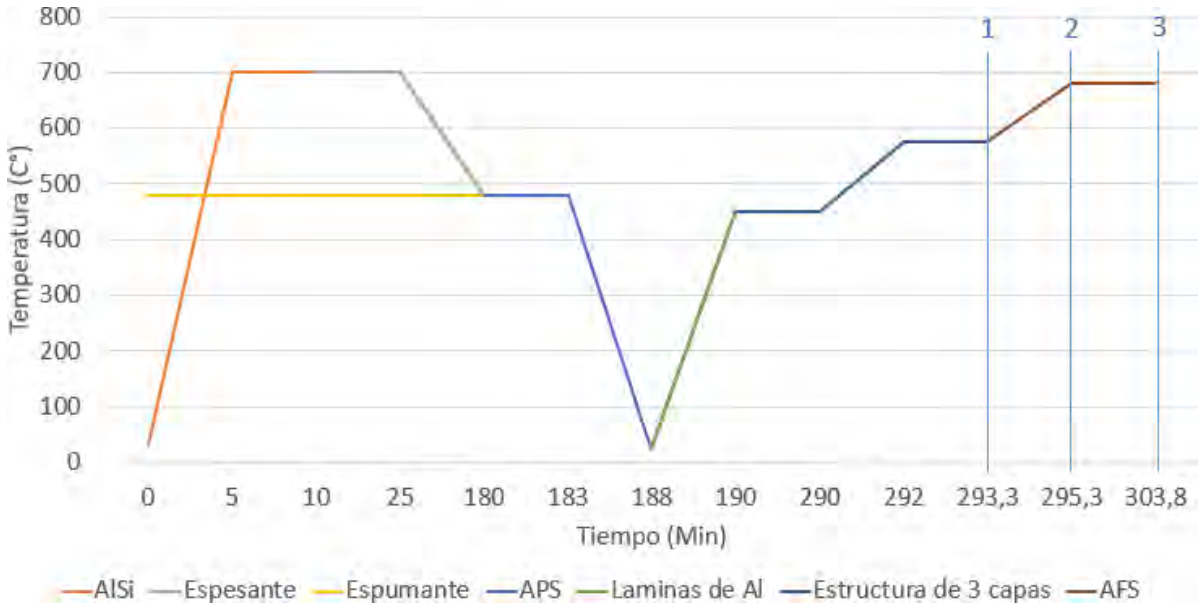



*Figura 8 Esquema de temperatura y tiempos del proceso.*

Como se puede observar en el gráfico, la expansión durante el proceso de espumación en función del tiempo se desarrolla en tres etapas: iniciación (1), pico de expansión (2) y colapso (3) (Gutiérrez-Vázquez & Oñoro, 2010). La fase de iniciación ocurre en los primeros 5 minutos de tratamiento. Posteriormente, entre los 5 y 7 minutos, tiene lugar la segunda etapa, caracterizada por un máximo en la expansión. Finalmente, en la tercera etapa, los poros comienzan a colapsar y el gas se libera, lo que provoca una disminución en la expansión. La descomposición del hidruro no ocurre de manera gradual y uniforme, sino que implica una liberación repentina de hidrógeno, generando un espumado rápido en la muestra precursora. Como resultado, se forma una espuma con paredes delgadas y poros grandes en tiempos de tratamiento reducidos. Sin embargo, estos poros son inestables y tienden a colapsar a medida que el tiempo de tratamiento se prolonga. Los tiempos de espumado idóneos dependen también del volumen del molde a llenar. En ese sentido, se recomienda un tiempo de espumación de 6 minutos para moldes de gran tamaño (Gutiérrez-Vázquez & Oñoro, 2010).

### 1.7. Resultados esperados.

La siguiente tabla presenta los valores estimados proyectados a partir del proceso desarrollado en este trabajo, con el objetivo de anticipar las propiedades esperadas del material. Estos valores se comparan con los de materiales convencionales comúnmente utilizados en vigas de paragolpes y cajas de impacto, con el fin de evaluar el potencial de mejora en términos de desempeño estructural y eficiencia energética.

*Tabla 2 Comparación de propiedades entre AFS y acero convencional en las autopartes seleccionadas.*

| Propiedad | AFS objetivo | Acero convencional |
|---|---|---|
| Tamaño de poro [mm] | 0,1 - 3 | - |
| Porosidad [%] | 40 - 80 | - |
| Espesor de lámina [mm] | 0,75 - 1,5 | - |
| Densidad [g/cm³] | 1,8 - 2,5 | 7,8 - 8 |
| Módulo de elasticidad [GPa] | 5 - 10 | 200 - 210 |
| Absorción de energía [kJ] | 0,4 - 1,2 | 0,03 - 0,06 |

Como puede verse en la tabla anterior, la estructura propuesta posee una densidad significativamente menor que el acero convencional, lo que beneficia a la reducción de peso. Aunque su módulo de elasticidad es mucho más bajo, su capacidad de absorción de energía es notablemente superior, lo que la hace ideal para componentes destinados a disipar impacto, alineándose con la aplicación prevista. Esta desventaja asociada a la baja rigidez será abordada mediante su integración en configuraciones tipo sándwich, donde el núcleo de espuma se combina con láminas exteriores que optimizan la respuesta estructural. Este aspecto será analizado en etapas posteriores del trabajo.

### 1.8. Trabajo futuro.

Como trabajo futuro, se propone llevar a cabo la fabricación experimental del núcleo de espuma de aluminio, con el fin de validar los resultados obtenidos en este estudio. Dado que la producción del panel sándwich completo requiere equipamiento específico y tecnología avanzada, se considera más factible, en una primera instancia, centrarse en la obtención y caracterización del precursor espumable y de la espuma expandida. La realización de la práctica permitirá verificar las condiciones de fabricación propuestas y observar los efectos sobre la porosidad, el tamaño y distribución de los poros, y la homogeneidad de la estructura. Además, se podrán contrastar estos resultados con los datos teóricos y bibliográficos relevados. Esta etapa servirá como base para futuras investigaciones orientadas a la fabricación completa de paneles sándwich, así como al análisis de sus propiedades mecánicas y su potencial aplicación en la industria.

## 2. CONCLUSIONES.

Del trabajo desarrollado se concluye lo siguiente:

- La reducción de peso es una prioridad en la industria automotriz. Si bien actualmente se emplean espumas plásticas en algunas aplicaciones, estas presentan baja rigidez y no son reciclables.
- Se identificaron la viga del paragolpes y la caja de impactos como las autopartes más adecuadas para la aplicación de estructuras sándwich con núcleo de espuma de aluminio (AFS).
- La configuración de AFS muestra un gran potencial como sustituto de los materiales convencionales en autopartes, gracias a su combinación óptima de bajo peso y alta resistencia mecánica.
- El método de fabricación más eficiente para la AFS es la unión in situ mediante laminado en caliente. La espuma se obtiene a partir de un precursor de metal fundido con agentes espumantes y espesantes.
- Los materiales seleccionados para el precursor espumable son: AlSiMg como aleación fundida, $TiH_2$ como agente espumante, CaCO3 o $Al_2O_3$ como espesante.
- Para las láminas de la AFS, se seleccionaron aleaciones de la serie 6000, en particular 6061 y 6082, debido a su equilibrio entre resistencia mecánica, soldabilidad y resistencia a la corrosión.

## 3. REFERENCIAS.


Pichler, M., Krenmayr, N., Brand, U., & Schneider, E. (2020). *EU industrial policy: Between modernization and transformation of the automotive industry.*

Cruz, Liz et al. (2021). *Modelado de espumas metálicas para su aplicación en aspas de aerogeneradores.*

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).* https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/

Taub, A. I., et al. (2019). *Materials for automotive lightweighting. Annual Review of Materials Research, 49*, 1–29.

Garzón, M. (2023). *Las claves del uso de aleaciones ligeras en la industria automotriz.*

Peng, B., et al. (2024). *Riding safety prediction of a high-speed train running on transition zone under foundation settlement.*

Australasian New Car Assessment Program (ANCAP). (s.f.). *Vehicle safety ratings.* https://www.ancap.com.au/

Du, B., Li, Q., Zheng, C., & Wang, S. (2023). *Application of lightweight structure in automobile bumper beam. Automotive Engineering, 45*(3), 112–119.

Forni, D., et al. (2023). *High and very-high strength steels under harsh conditions of temperature and loading.*

Koukal, J., & Macha, M. (2021). *Composites for automotive applications.* Wiley-Blackwell.

Spasenović, J., & Blagojević, I. (2021). *Composite materials in automotive industry: A review. Composites Part B: Engineering, 218*, 108890.

Tomin, M., & Kmetty, Á. (2021). *Polymer foams as advanced energy absorbing materials for sports applications. Polymer Testing, 94*, 107045.

Zeng, F., Xie, H., Liu, Q., Li, F., & Tan, W. (2016). *Design and optimization of a new composite bumper beam in high-speed frontal crashes. Composite Structures, 145*, 40–52.

Zewdie, F., et al. (2024). *Experimental investigation on the development of hybrid composite metal foam reinforced with steel hollow spheres for higher energy absorption applications.*

Li, Z., Yu, Q., Zhao, X., Yu, M., Shi, P., & Yan, C. (2017). *Crashworthiness and lightweight optimization to applied multiple materials and foam-filled front end structure of auto-body. Thin-Walled Structures, 120*, 301–310.

Nava, M. G., Cruz-Ramírez, A., Rosales, M. Á. S., Gutiérrez Pérez, V. H., & Sánchez Martínez, A. (2017). *Fabrication of aluminum alloy foams by using alternative thickening agents via melt route. Metallurgical and Materials Transactions A, 48*(4), 1718–1728.

Ghimire, A., Hsu, C.-H., & Lin, C.-C. (2024). *Hierarchical nested honeycomb-based energy absorbers: Design factors and tailorable mechanical properties.*

Hexcel Composites. (2000). *Honeycomb sandwich design technology (HexWeb™).*

Girolamo, D., Chang, H.-Y., & Yuan, F.-G. (2018). *Impact damage visualization in a honeycomb composite panel through laser inspection using zero-lag cross-correlation imaging condition. Composites Science and Technology, 164*, 145–153.

Sharma, S. S., Yadav, S., Joshi, A., Goyal, A., & Khatri, R. (2022). *Application of metallic foam in vehicle structure. Materials Today: Proceedings, 51*, 1919–1924.

Banhart, J., et al. (2001). *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science, 46*(5), 559–632.

Nisa, S. U., Pandey, S., & Pandey, P. M. (2022). *Compressive properties of closed-cell aluminum metal foams. Materials Today: Proceedings, 59*, 1521–1528.

Hai, H., & Zhengbin, X. (2014). *High-efficiency continuous casting method of structure-controllable closed cell foam aluminum ingot. Procedia Materials Science, 4*, 207–212.

Konstantinidis, I. C., Paradisiadis, G., & Tsipas, D. (2009). *Analytical models for the mechanical behavior of closed and open-cell Al foams. Materials Science Forum, 595–598*, 93–98.

Gergely, V., & Clyne, B. (2000). *The FORMGRIP process: Foaming of reinforced metals by gas release in precursors. Acta Materialia, 48*(15), 3875–3882.

Rodinger, T., Ćorić, D., & Alar, Ž. (2023). *The influence of foaming agents on aluminium foam cell morphology. Materials Today: Proceedings, 72*, 122–131.

Ejiofor, J. U., & Reddy, R. G. (1997). *Developments in the processing and properties of particulate Al–Si composites. Journal of Materials Processing Technology, 68*(1), 40–50.

Matijasevic-Lux, B., Banhart, J., & Fiechter, S. (2006). *Modification of titanium hydride for improved aluminium foam manufacture. Acta Materialia, 54*(7), 1887–1894.

Byakova, A., Gnyloskurenko, S., & Vlasov, A. (2022). *The mechanical performance of aluminum foam fabricated by melt processing with different foaming agents: A comparative analysis. Materials Research Express, 9*(4), 045002.

González-Nava, M., Cruz-Ramírez, A., & Suárez-Rosales, M. A. (2018). *Thermodynamic analysis of the aluminum alloy foaming process by melt route. Journal of Materials Science, 53*(18), 12785–12793.

Rathnaweera, G. (2014). *Properties of metal/epoxy foam hybrid structures. Composite Structures, 113*, 1–10.

Metalfoam. (s.f.). *Globally unique: The solution for lightweight constructions.* https://www.metalfoam.net

Neu, T. R., Heim, K., Seeliger, W., Kamm, P. H., & García-Moreno, F. (2024). *Aluminum foam sandwiches: A lighter future for car bodies. Advanced Engineering Materials, 26*(3), 2400157.

Banhart, J., & Seeliger, H.-W. (2008). *Aluminium foam sandwich panels: Manufacture, metallurgy and applications. Advanced Engineering Materials, 10*(9), 793–802.

Lin, H., Luo, H. J., Huang, W. Z., Zhang, X., & Yao, G. C. (2016). *Diffusion bonding in fabrication of aluminum foam sandwich panels. Materials Science and Engineering A, 669*, 115–122.

Song, Z. L., Ma, L. Q., Wu, Z. J., & He, D. P. (2000). *Effects of viscosity on cellular structure of foamed aluminum in foaming process. Materials Letters, 45*(2), 90–95.

Padron, G. (2023). *Effect of viscosity (or lack thereof) on the flooding point in a gassed stirred tank. Chemical Engineering Journal, 468*, 144145.

Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., & Kitahara, A. (2002). *ALPORAS aluminum foam: Production process, properties, and applications. Advanced Engineering Materials, 4*(10), 763–772.

Matijasevic, L. B., Banhart, J., Fiechter, S., Görke, O., & Wanderka, N. (1987). *Modification of titanium hydride for improved aluminium foam manufacture.*

Jimenez, C., Garcia, M. F., Rack, A., Tucoulou, R., Klaus, M., Pfretzschner, B., Rack, T., Cloetens, P., & Banhart, J. (2012). *Partial decomposition of $TiH_2$ studied in situ by energy-dispersive diffraction and ex situ by diffraction microtomography of hard X-ray synchrotron radiation. Acta Materialia, 60*(17), 5981–5991.

Baumeister, J., Banhart, J., & Weber, M. (1997). *Aluminium foams for transport industry. Fraunhofer Institute for Applied Materials Research.*

Gutiérrez-Vázquez, J. A., & Oñoro, J. (2010). *Fabricación y comportamiento de espumas de aluminio con diferente densidad a partir de un precursor AlSi12. Revista de Metalurgia, 46*(6), 475–483.

# Transformación digital en PyMEs, hacia el Lean 4.0. El caso de una PyME de la Provincia de Buenos Aires

Tornillo, Julián; Seminario, Andrea; Fretes, Sonia; Walas Mateo, Federico. Facultad de Ingeniería, UNLZ

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ) .*
*fwalas@ingeniería.unlz.edu.ar*

**RESUMEN**

Este trabajo se enmarca en un proyecto de desarrollo tecnológico entre la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ) y una empresa dedicada al diseño y fabricación de componentes para las industrias textil, vitivinícola y marroquinera, así como para productos publicitarios y diseños especiales. El objetivo del trabajo es desarrollar e implementar una solución tecnológica basada en una plataforma IIoT (Internet Industrial de las Cosas), integrada con un sistema ERP (Enterprise Resource Planning), que permita capturar y gestionar datos de producción en tiempo real para optimizar la gestión operativa y avanzar hacia un modelo Lean 4.0. La empresa atraviesa un proceso de transformación digital orientado a incorporar herramientas que posibiliten la recolección e integración de datos para mejorar la toma de decisiones. Se presenta una experiencia de desarrollo e implementación de un software de gestión y monitoreo de producción en tiempo real, concebido inicialmente para el sector textil pero aplicable a otros entornos con características similares. El proyecto se desarrolla en el marco de la Industria 4.0 y fue financiado por el Fondo de Innovación Tecnológica de la Provincia de Buenos Aires (FITBA 2024).

**Palabras Claves:** Lean 4.0, PyMES Bonaerenses, Industria 4.0, IIoT, Transformación Digital.

**ABSTRACT**

This work is part of a technological development project carried out between the Faculty of Engineering of the National University of Lomas de Zamora (UNLZ) and a company dedicated to the design and manufacture of components for the textile, wine, and leather goods industries, as well as for advertising products and special designs. The main objective of this work is to develop and implement a technological solution based on an Industrial Internet of Things (IIoT) platform integrated with an Enterprise Resource Planning (ERP) system, aimed at capturing and managing real-time production data to optimize operational management and move toward a Lean 4.0 model. The company is undergoing a digital transformation process focused on incorporating tools that enable data collection and integration to improve decision-making. The paper presents the experience of developing and implementing customized software for data management and real-time production monitoring, originally designed for the textile sector but applicable to other industries with similar characteristics. The project was developed within the framework of Industry 4.0 and funded by the Technological Innovation Fund of the Province of Buenos Aires (FITBA 2024).

**Keywords:** Lean 4.0, SMEs in Buenos Aires, Industry 4.0, IIoT, Digital Transformation

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo expone una experiencia práctica sobre la implementación de una plataforma IIoT en una empresa del sector textil en la provincia de Buenos Aires, Argentina. La adopción de esta arquitectura de hardware y software se orienta a identificar oportunidades de optimización en los procesos industriales. El caso desarrollado busca mostrar cómo la incorporación de esta infraestructura sienta las bases para avanzar hacia modelos analíticos más sofisticados, en particular hacia la analítica prescriptiva. Asimismo, la organización en la que se lleva a cabo la experiencia se encuentra en un proceso de transformación hacia el modelo de Industria 4.0 (I4.0).

En investigaciones previas de los autores [1,2], se han abordado los fundamentos del IIoT y el rol de su arquitectura como generadora de datos que facilitan la gestión de los procesos operativos en consonancia con la planificación empresarial. Dichos estudios también destacan a este paradigma tecnológico como un habilitador de la optimización de procesos mediante la analítica descriptiva, considerándolo además como un punto de partida para la evolución hacia la analítica prescriptiva [3].

La creciente penetración de dispositivos dentro de arquitecturas IIoT, dotados de capacidades de sensado y comunicación, ha permitido a las compañías interconectar equipos en planta y conformar sistemas ciberfísicos capaces de generar y recolectar datos a lo largo de todo el entorno industrial [4]. Este desarrollo ha impulsado también un renovado interés en la convergencia entre Tecnología de Operaciones y Tecnología de Información (OT/IT), identificada en [5] como una de las principales áreas de inversión en el corto plazo.

Por otra parte, cobra relevancia la relación entre Lean Management (LM) e I4.0, ya que ambos enfoques comparten el propósito de eliminar desperdicios en los procesos de negocio, mejorando la eficiencia y la competitividad [6]. La mayor visibilidad de los datos operativos posibilita reducir actividades sin valor agregado e identificar nuevas oportunidades de mejora.

Este artículo presenta el abordaje de tres casos en diferentes pymes del Gran Buenos Aires. Se trata de una empresa que produce insumos para el sector textil. El proceso de adopción de herramientas Lean 4.0 comenzó hace aproximadamente dos años con la participación de un equipo de trabajo que forma parte del Instituto de Investigaciones en Ingeniería Industrial (I4) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ).

El artículo pretende describir una reconversión productiva a partir de la incorporación de tecnologías 4.0 como IIoT, big data y computación en la nube para elaborar y obtener un sistema de gestión a partir de indicadores a pie de máquina en tiempo real y que representen el estado actual y la tendencia en la performance de la producción. Esta información generada se integra a los distintos sistemas informáticos existentes actualmente en la empresa. De esta manera modernizar la maquinaria utilizada para la producción a partir de la incorporación de tecnologías de IIoT para recolectar datos de producción en tiempo real. Además, se definirán los indicadores clave a medir y presentar sus resultados en los monitores que se instalen a pie de máquina (ANDON para gestión visual de la producción).

La estructura de este documento se organiza de la siguiente manera: primero se presentan los conceptos fundamentales y los enfoques actuales en la literatura sobre recopilación de datos, infraestructura OT/IT e integración de información en entornos industriales. Posteriormente, se expone el caso de estudio y los resultados obtenidos, para finalizar con las conclusiones.

## 2. MARCO CONCEPTUAL.

En el marco de los sistemas de producción inteligente, el ecosistema de manufactura está compuesto por una amplia variedad de dispositivos que recolectan datos de los distintos procesos industriales. [7] afirma que IIoT es una nueva generación de tecnología que se enriquece con la existencia de soluciones que toman datos a nivel piso de planta (sensores, actuadores, etc.) con altos grados de precisión. Por lo tanto, la visibilidad de las operaciones ha avanzado a nuevos niveles que facilitan la adquisición de una vasta cantidad de datos y retroalimentación prácticamente instantánea. De esta manera es posible adoptar algoritmos de Inteligencia Artificial (IA) que facilitan la productividad y eficiencia en los procesos.

Para iniciar la discusión sobre la generación de datos del proceso industrial, el artículo [8] destaca la necesidad de considerar el enfoque de sistemas al abordar la investigación en la integración de la información industrial. El texto presenta el modelado y la integración de flujos de información para la vinculación de la información empresarial a través de la arquitectura que propone IIoT.

El tema de la recopilación e integración de información ha sido abordado por organismos de normalización autorizados como la Sociedad Internacional de Automatización (ISA) [9] y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) [10]. Como ejemplo, el estándar multicapa IEC 62264 basado en las especificaciones ISA-95 [11] define un marco de intercambio de modelos de información que permite la integración de aplicaciones que se ejecutan en áreas de gestión, y operaciones. Las empresas que cumplen con este estándar pueden definir interfaces entre el control y las funciones de gestión, lo que les permite tomar decisiones informadas sobre los datos para intercambiar de forma que los costos y los riesgos se mantengan bajos en caso de errores de implementación.

La figura 1 muestra la arquitectura de niveles que propone el estándar ANSI/ISA-95. Esta norma internacional ha sido generada para abordar los problemas que surgen durante el desarrollo de interfaces automatizadas en el ámbito de los sistemas de gestión de la empresa y los sistemas de control. Este estándar proporciona una guía para la integración vertical de la información de la firma. El estándar ISA 95 define un modelo de jerarquía funcional para categorizar las funciones de las empresas industriales. Este modelo de 5 capas es conocido como la pirámide de automatización.

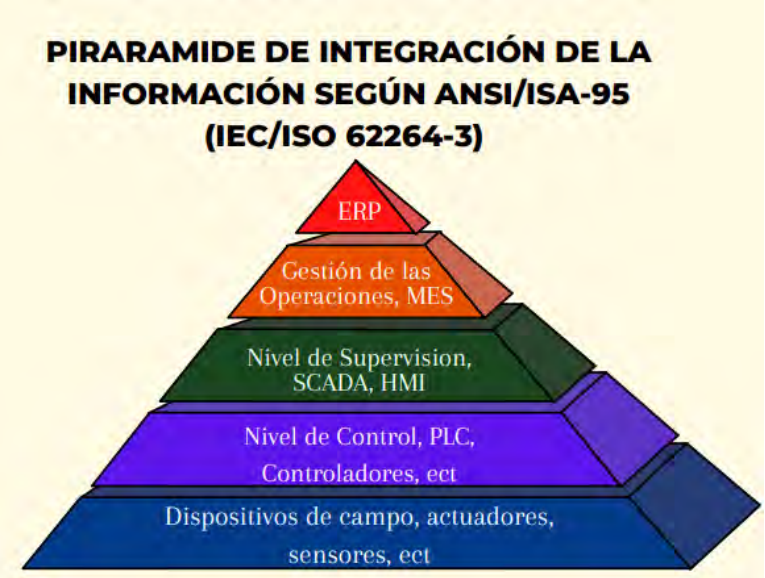



*Figura 1 Modelo de integración vertical de la Información que propone el estándar ANSI/ISA 95. Fuente: Elaboración propia.*

Con respecto a la mirada sobre LM y el modelo I4.0. El artículo [12] destaca el creciente interés por la vinculación entre LM e I4.0, con el objetivo de eliminar los desperdicios de los procesos de negocio para mejorar su eficiencia, así como su competitividad [13]. A pesar de la existencia de documentos que combinan estos dos enfoques, no existe una sistematización integral del conocimiento existente que estudie la interacción entre todos ellos.

## 3. DESARROLLO DEL CASO

El caso de estudio se ejecutó como un proyecto de transformación digital en una PyME proveedora del sector textil en la Provincia de Buenos Aires, en el marco del Fondo de Innovación Tecnológica de Buenos Aires (FITBA). Su objetivo general fue reconvertir productivamente la planta incorporando tecnologías 4.0 (IIoT, big data y servicios en la nube) para capturar datos a pie de máquina en tiempo real y gestionar la producción mediante indicadores integrados con los sistemas informáticos existentes (ERP y aplicativos internos).

La ejecución se estructuró en dos grandes etapas con subfases: (i) relevamiento y reingeniería, definición de indicadores y diseño de aplicativos; (ii) adquisiciones e instalación, integración y programación de sistemas, puesta en servicio, testing y ajustes, capacitaciones, entrada en operación y estabilización. La ejecución inició en febrero 2024, y alcanzó 100% de avance, con cierre técnico en 2025.

Previo a la intervención la empresa no contaba con mediciones sostenibles, automáticas y en tiempo real sobre la performance operativa de planta. Se apoyaba en prácticas manuales con capacidad limitada para monitoreo en tiempo real y trazabilidad de paradas. La empresa buscaba adoptar un esquema de captura y análisis que habilitara decisiones informadas que permitieran una mejor programación de la producción, que integren la gestión administrativa y comercial, alineadas con la convergencia OT/IT propia de Industria 4.0.

La operación del sector de inyección presentaba como línea de base un tiempo de ciclo promedio de 25 s y tiempos de setup en torno a 120 min. La ausencia de OEE como indicador regular impedía priorizar acciones de mejora sobre disponibilidad, rendimiento y calidad, y dificultaba comparar desempeño entre máquinas y entre bocas de una misma inyectora. Estas condiciones motivaron la necesidad de instrumentar captura en tiempo real y parametrizar causas de parada para análisis posterior.

Se implementó una arquitectura IIoT desarrollada por la firma DATACORE [14] compuesta por módulos de captura de datos y sensores conectados a las inyectoras para registrar en tiempo real tiempos de ciclo, estados de operación, paradas y alertas, con conexión directa a la red industrial y criterios de seguridad operativa.

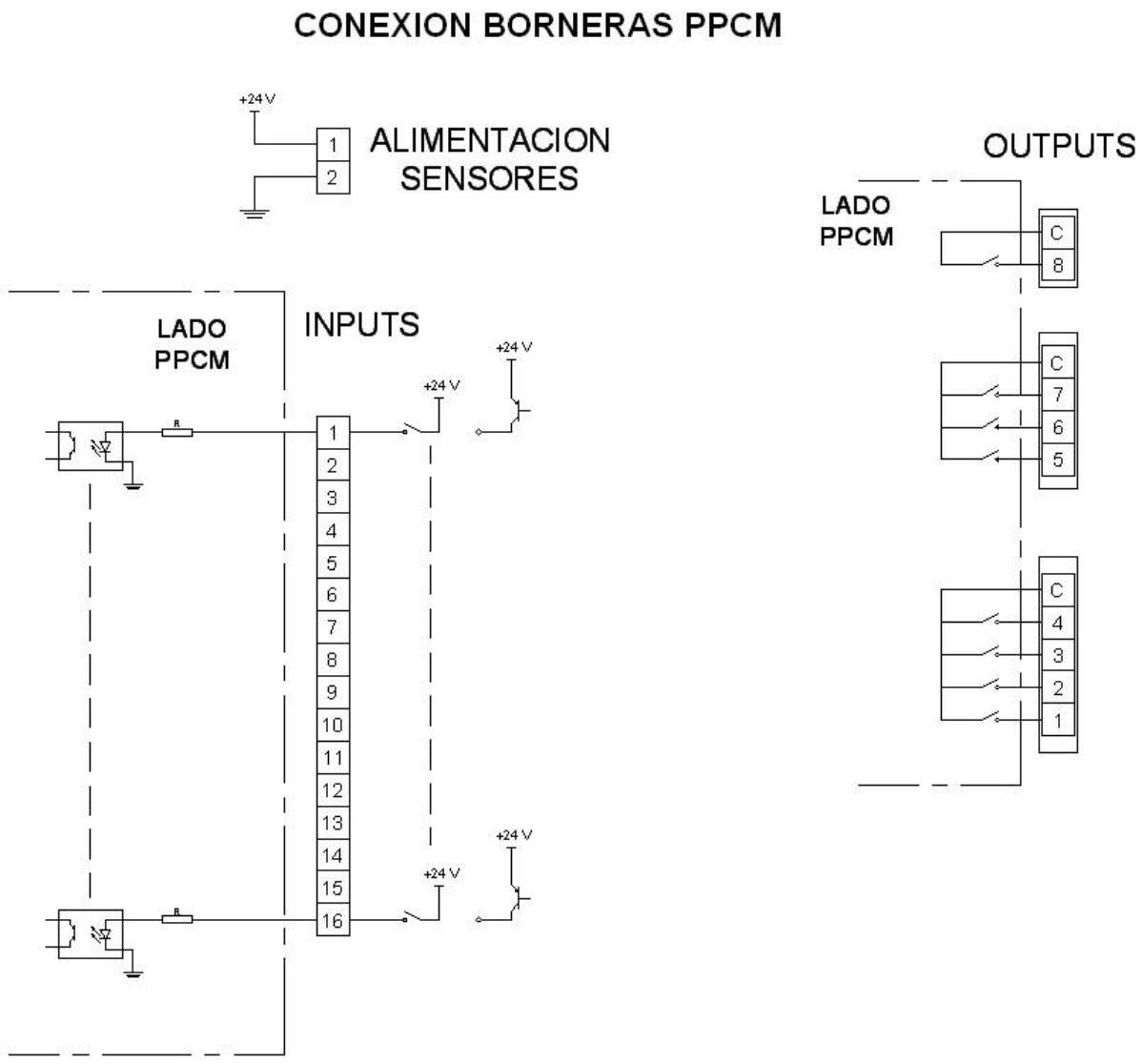



*Figura 2 “Arquitectura de captura en planta”*

El desarrollo conceptual comprendió la reutilización de la tecnología existente en los equipos, y la adaptación de software que permita sensar y diferenciar las métricas para cada boca de inyección, para poder fabricar diferentes productos (en cada boca) de manera simultánea. A nivel lógico, se implementó un esquema por boca (cuatro por máquina) para diferenciar métricas por boca y por artículo, evitando que indicadores promedio oculten desvíos por producto y proceso; sobre ese modelo se calcularon OEE por máquina y por boca.

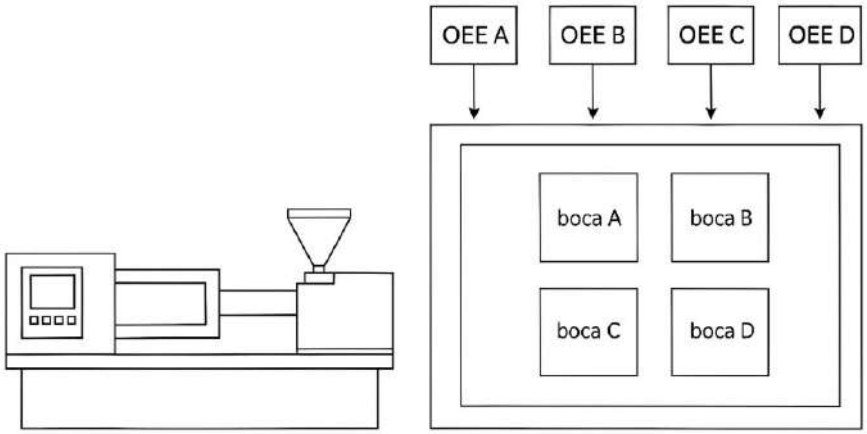



*Figura 3 Esquema de alto nivel de la solución y la separación por bocas de inyección*

Para gestión visual se dispuso:

1. Un tablero ANDON que detalla el estado de las bocas por colores, las cantidades producidas y el cumplimiento del plan.
2. Vistas de detalle de boca con indicadores de cantidades producidas, tiempos de ciclo, tiempos de parada y OEE.
3. Un panel de gestión y reporte de paradas con causas parametrizables.




*Figura 4 ANDON de planta, con métricas generales por boca*

En la Figura 4 se observa el Andon diseñado para el monitoreo de todas las máquinas integradas a la solución tecnológica (INY5, INY6, INY7, INY8). Se observa que cada inyectora tiene un esquema en

donde se separan las cuatro bocas disponibles (A-B-C-D), como si fueran máquinas independientes con su respectivo valor de productividad. En todos los casos se muestra el estado actual con un color específico (en producción, en setup, parada programada, falla o sin utilizar) y también indicadores referidos a la cantidad producida y estado de cumplimiento del plan de producción.

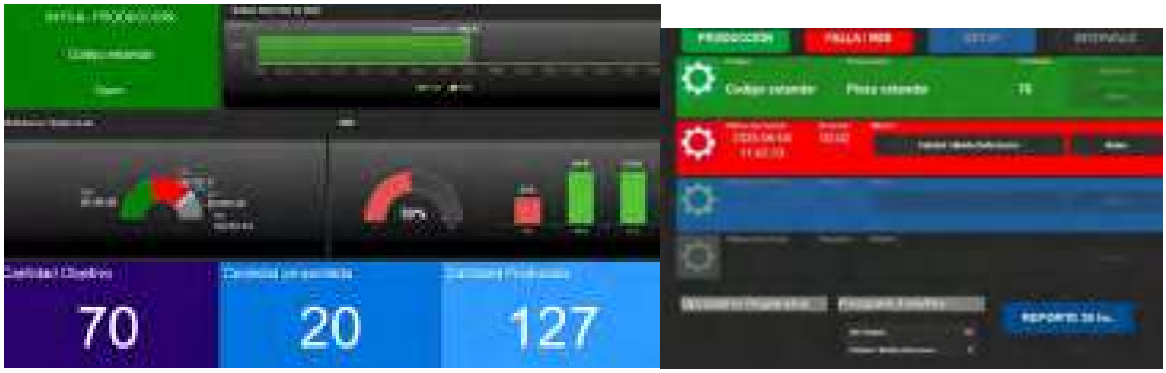



*Figura 5: (a) Tablero de control para una boca en particular de una inyectora; (b) Reporte de paradas*

En la Figura 5 se muestra un detalle de los indicadores diseñados para la Inyectora 5A (Inyectora 5, boca A), donde se muestran: su estado de cumplimiento del plan de producción, cantidades producidas, tiempos de parada y el OEE. Con estas métricas se construyeron otras vistas que muestran el código de ítem que se encuentra en producción (o en cola de producción), las cantidades producidas, el último tiempo de ciclo y los últimos reportes de parada con el detalle de las causas (pre-seteadas).




*Figura 6: Tablero de OEE para cada inyectora, diferenciando los resultados para cada boca*

En la Figura 6 se muestra el tablero diseñado para ver todos los OEE para una misma máquina y el detalle de los tiempos usados en sus respectivas bocas.

Finalmente la implementación de este proyecto permitió:

- Generar indicadores operativos globales y específicos que permitieron detectar oportunidades de mejora y ejecutar acciones que ataquen las causas raíces por boca de inyección que contribuyan a la disminución del tiempo de ciclo, del tiempo de setup y en consecuencia, aumenten el OEE.

| Métrica de impacto | Unidad de Medida | Valor inicial estimado (previo al proyecto) | Valor final estimado (posterior al proyecto) |
|---|---|---|---|
| OEE | % | - (Sin medición) | 56% |
| Tiempo SETUP promedio sector de inyección | Minutos | 120 minutos | 90 minutos |
| Tiempo de ciclo promedio sector de inyección | Segundos | 25 segundos | 15 segundos |

*Tabla 1: Comparación de los principales indicadores de situación inicial y la situación posterior al proyecto.*

- Gestionar de forma visual y analítica mediante el uso de tableros Andon en el piso de planta. Esto no solo le da nuevas herramientas y visibilidad en tiempo real a los tomadores de decisiones sino que contribuye con la cultura de la mejora continua en todos los trabajadores involucrados en el proceso, dado que el diseño de los tableros, basado en las métricas que suelen mirar los operadores de las máquinas, y las alertas con colores contribuyen al compromiso con el cumplimiento de las métricas/objetivos seteados para cada máquina de inyección.

- Mejorar la programación de la producción gracias a la desagregación por boca ya que permite la optimización de secuencias y setups con mayor mix y menor volumen.

## 4. CONCLUSIONES.

Este caso confirma la relevancia de la mirada ecosistémica para la adopción del modelo I4.0 en PyMEs: la colaboración entre la empresa productiva, la Universidad (UNLZ) y la firma tecnológica (DATACORE), apalancada por el financiamiento estatal (FITBA), fue condición habilitante para reducir barreras técnicas y económicas y acelerar la transferencia de conocimiento.

Como primer logro, se implementó una arquitectura IIoT robusta que captura, integra y visualiza datos operativos en tiempo real. Este andamiaje permitió empoderar a las personas mediante tableros ANDON y vistas por boca, acompañados de talleres para fortalecer habilidades digitales. La gestión visual y la disponibilidad ubicua de información facilitaron la adopción de rutinas de mejora continua alineadas con Lean Manufacturing y sentaron las bases de Lean 4.0.

La trazabilidad fina por boca y la parametrización de causas de parada fueron diferenciales del sistema informático desarrollado: al evitar promedios que ocultan variabilidad, se habilitó un análisis más preciso de disponibilidad, rendimiento y calidad. Esto se reflejó en los resultados operativos: incremento del OEE hasta 56% (desde ausencia de medición sistemática), reducción del tiempo de setup de 120 a 90 min y del tiempo de ciclo de 25 a 15 s. Aunque no se establece causalidad estricta, la evidencia sugiere que la captura en tiempo real, la gestión visual y el feedback operativo acotaron pérdidas por micro-paradas, desvíos de ciclo y setups no estandarizados.

En términos de convergencia OT/IT, el proyecto avanza de la analítica descriptiva hacia escenarios de analítica prescriptiva: (i) estandarización de OEE por boca/máquina; (ii) priorización de cuellos de botella según pérdidas; (iii) preparación para programación y secuenciación optimizada (considerando mix, tiempos de cambio y demanda). La planificada integración ERP es la siguiente palanca para

vincular planes de producción, materiales y órdenes con desempeño en piso, cerrando el loop planificación–ejecución–aprendizaje.

La solución, concebida para textil, es transferible a otros procesos con máquinas multiboca o celdas paralelas, siempre que se preserve la granularidad por recurso y artículo. Aunque cabe destacar que requiere gobernanza de datos, gestión del cambio sostenida, ciberseguridad industrial y control del hardware, licencias y mantenimiento.

La combinación de IIoT + modelo por boca + ANDON + cultura de mejora, para este caso, explicó buena parte de las mejoras observadas y habilita el siguiente salto: integración ERP y prescripción operativa para sostener y escalar Lean 4.0 en la PyME.

## 5. REFERENCIAS.


1. Walas Mateo, F., Redchuk, A. “Artificial Intelligence as a Process Optimization driver under industry 4.0 framework and the role of IIoT, a bibliometric analysis”. – JIIM. Journal of Industrial Integration and Management Innovation & Entrepreneurship. ISSN (print): 2424-8622 | ISSN (online): 2424-8630.(2020)

2. Walas Mateo, F., Redchuk, A., Tornillo, J.E. Gestión de datos de la operación en la industria a través de plataformas IIoT. Experiencia en una empresa del sector alimentos en Argentina. 52 JAIIO. Septiembre 2023.

3. Lepenioti, K., Pertselakis, M., Bousdekis, A., Fenareti Lampathaki, A. L., Apostolou, D., Mentzas, G., Anastasiou. S. “Machine Learning for Predictive and Prescriptive Analytics of Operational Data in Smart Manufacturing.” Dupuy-Chessa S., Proper H. (eds) Advanced Information Systems Engineering Workshops. CAiSE 2020. Lecture Notes in Business Information Processing, vol 382. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49165-9_1

4. Tapoglou, N.; Mehnen, J.; Butans, J. Energy Efficient Machining Through Evolutionary Real-Time Optimization of Cutting Conditions on CNC-Milling Controllers. In Experiments and Simulations in Advanced Manufacturing; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2021; pp. 1–18.

5.Gartner. When IT and Operational Technology Converge. Available online: https://www.gartner.com/smarterwithgartner/when-it-and-operational-technology-converge (accedido 3 febrero 2025).

6. Lai NYG, Wong KH, Halim D, et al. 2019. “Industry 4.0 enhanced lean manufacturing”. In: 2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM). IEEE, pp 206–211.

E. Yalcinkaya, A. Maffei, H. Akillioglu, M. Onori. (2021). Empowering ISA95 compliant traditional and smart manufacturing systems with the blockchain technology. Manufacturing Review. 8, 15

8. W. He, L. Xu. (2014). Integration of Distributed Enterprise Applications: A Survey. IEEE Transactions on Industry Informatics, 10(1), pp. 35-42.

9. ISA. International Society of Automation. Available online: https://www.isa.org/ (accedido 1 abril 2023).

10. International Electrotechnical Commission. Available online: https://www.iec.ch/ (acce-dido 1 abril 2023).

11. American National Standards Institute (ANSI), ISA-95.00.01-2010, ISA-95.00.02-2010, ISA-95.00.03-2013, ISA-95.00.04-2012, ISA-95.00.05-2013. North Carolina USA.

12. Ciano, M.P., Pozzi, R., Rossi, T., Strozzi, F. 2019. “ How IJPR has addressed ‘lean’: a literature review using bibliometric tools”. Int. J. Prod. Res. 57, 5284–5317

13. Lai NYG, Wong KH, Halim D, et al. 2019. “Industry 4.0 enhanced lean manufacturing”. In: 2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM). IEEE, pp 206–211

14. Solución Datacore https://https://www.datacore.com.ar/ (accedido 1 abril 2025)

# ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE COMBUSTIÓN DE MEZCLAS DE BIODIESEL DE PALMA Y DIÉSEL EN UNA CALDERA PIROTUBULAR

Chulde, Diego; Robles Carrillo, Nilo M.; Campoverde, Andrés; Toapanta, Ángel.

*Instituto de Investigación Geológico y Energético*
*diego.chulde@geoenergia.gob.ec*

**RESUMEN**

Este estudio evaluó el desempeño energético y ambiental de una caldera pirotubular Fulton VMP-60 utilizada en la agroindustria del cacao ecuatoriano, mediante la combustión de diésel fósil y mezclas con biodiésel de palma en proporciones del 5 %, 10 % y 20 % (BD5, BD10 y BD20). Los ensayos experimentales se realizaron durante la fase de arranque de la caldera y se analizó la eficiencia térmica a través del método indirecto de pérdidas de calor. Los resultados mostraron que la eficiencia alcanzada con diésel puro fue de 80,41 %, mientras que las mezclas con biodiésel presentaron reducciones minimas hasta 78,15 %, atribuibles al menor poder calorífico y mayor contenido de humedad del biocombustible. En términos de emisiones, se registró una disminución progresiva de $SO_2$, pasando de 283,5 mg/Nm³ con diésel puro a 240,6 mg/Nm³ con BD20, mientras que las mezclas bajas (BD5 y BD10) evidenciaron ligeras reducciones en $CO_2$ frente al diésel, lo que refleja una combustión más completa. Estos resultados confirman que las mezclas bajas y medias de biodiésel representan el mejor trabajo entre eficiencia energética y mitigación ambiental, reduciendo la dependencia del diésel fósil y posicionándose como una alternativa técnica viable para el sector agroindustrial del cacao en Ecuador.

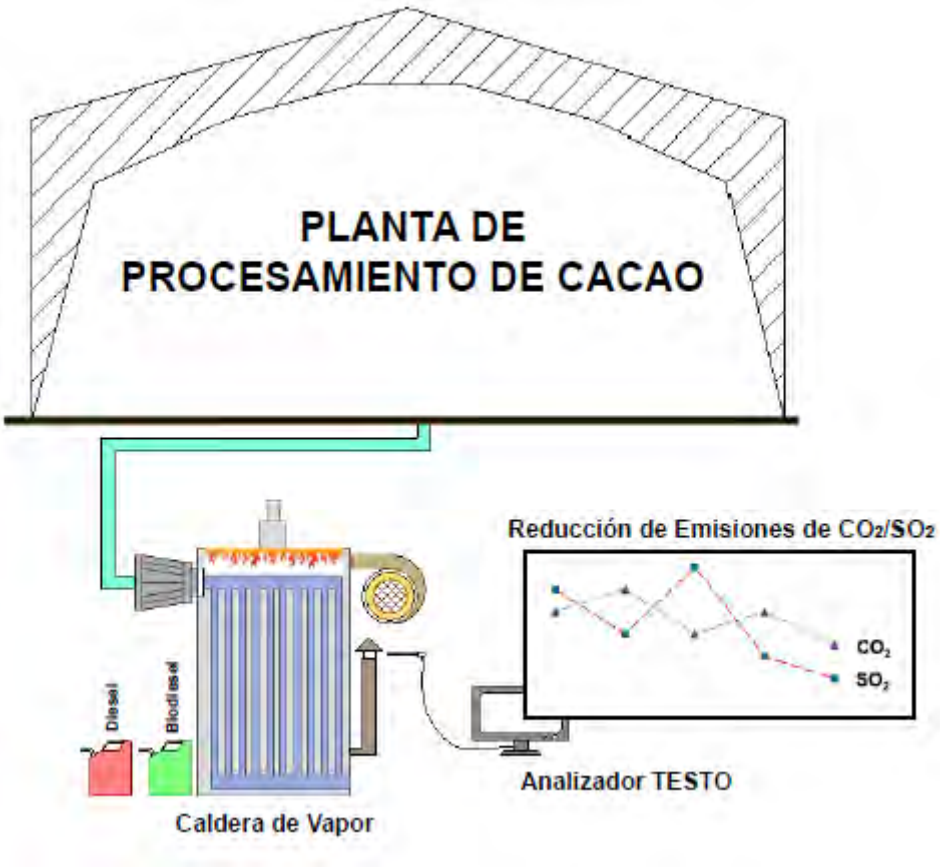
**Palabras Claves:** Biodiésel de palma, Caldera pirotubular, Eficiencia térmica, Emisiones de combustión

**ABSTRACT**

This study evaluated the energy and environmental performance of a Fulton VMP-60 fire-tube boiler, used in a cocoa agro-industrial plant in Ecuador, by testing blends of diesel fuel and oil palm-based biodiesel at 5%, 10%, and 20% ratios (BD5, BD10, and BD20, respectively). Experimental tests were conducted during the boiler's start-up phase, and thermal efficiency was analyzed using the indirect heat-loss method. Results showed that the efficiency with pure diesel was 80.41%, while biodiesel blends exhibited slight reductions, with BD20 reaching a minimum efficiency of 78.15%. This decrease is attributed to the biodiesel's lower calorific value and higher moisture content. In terms of greenhouse gas emissions, there was a progressive reduction in $SO_2$ emissions, from 83.5 mg/Nm³ with pure diesel to 240.6 mg/Nm³ with BD20. Intermediate blends (BD5 and BD10) also showed slight reductions in $CO_2$ emissions compared to pure diesel, indicating a more complete combustion process. These results suggest that low to medium biodiesel blends offer an effective compromise between maintaining energy efficiency and improving environmental performance. As such, they represent a viable technical alternative for reducing diesel dependency in Ecuador's cocoa agro-industrial sector.

**Keywords:** Palm biodiesel, Fire tube boiler, Thermal efficiency, Combustion emissions

**RESUMEN GRÁFICO**



## 1. INTRODUCCIÓN

El cacao constituye uno de los principales productos agrícolas del Ecuador, reconocido mundialmente por su calidad y como base del denominado cacao fino de aroma. En 2023, el país alcanzó una producción aproximada de 375.720 toneladas métricas, consolidándose como uno de los mayores productores globales (Statista, 2024). Las exportaciones de cacao y sus derivados representaron alrededor de 1.172 millones de USD, equivalentes al 14,5 % del valor mundial de exportaciones de este rubro (TrendEconomy, 2024; Tridge, 2025), mientras que el consumo nacional se concentra principalmente en la industria chocolatera y agroalimentaria local. Este sector involucra a más de 150.000 familias productoras, de las cuales cerca del 70 % son pequeños agricultores, lo que evidencia la importancia económica, social y cultural de este cultivo para el país (Rikolto, 2023).

La industria agroalimentaria se enfrenta al desafío de incrementar su productividad reduciendo al mismo tiempo el impacto ambiental derivado del uso intensivo de energía. En Ecuador, uno de los sectores de mayor relevancia es la agroindustria del cacao, en la cual procesos como el tostado, prensado y transformación de la semilla requieren un suministro continuo de vapor. Para ello, organizaciones como Maquita Agro, ubicada en la ciudad de Guayaquil, emplea una caldera pirotubular, diseñada para operar con diésel como combustible principal y con una capacidad nominal que garantiza el suministro de vapor para la producción. No obstante, el uso de combustibles fósiles conlleva emisiones significativas de dióxido de carbono ($CO_2$) y óxidos de azufre ($SO_x$), contaminantes asociados con el cambio climático y la lluvia ácida (Lin & Wu, 2023).

El reemplazo parcial de diésel por biodiésel se ha planteado como una alternativa técnicamente viable para reducir las emisiones de contaminantes sin modificar sustancialmente los sistemas de combustión. El biodiésel, obtenido a partir de aceites vegetales mediante procesos de transesterificación, se caracteriza por su alto contenido de oxígeno, baja toxicidad, ausencia de azufre y buena miscibilidad con diésel fósil (Rajendran et al., 2023). Estudios recientes han demostrado que las mezclas biodiésel-diésel permiten disminuir considerablemente las emisiones contaminantes sin pérdidas relevantes en eficiencia. Por ejemplo, Al-Omari et al. (2021) reportaron que el uso de biodiésel en calderas industriales permitió una reducción de hasta 99,5 % en $SO_2$ y una eficiencia energética máxima de 86,6 %. De manera complementaria, Islam et al. (2020) mostraron que mezclas bajas de biodiésel (BD5–BD20) en motores diésel contribuyen a reducir emisiones de $CO_2$, NOx y humo visible, con un impacto mínimo sobre la eficiencia de combustión.

Los estudios en calderas han confirmado la viabilidad técnica y ambiental del uso de biodiésel. Ghorbani et al. (2011) encontraron que las mezclas bajas (≤20 %) de biodiésel de palma en calderas tubulares mantienen un consumo de combustible similar al del diésel puro, mientras que proporciones superiores al 50 % incrementan el consumo hasta en 17 % por su menor poder calorífico y mayor viscosidad. De forma complementaria, Aydin y Boke (2010) evidenciaron que modificaciones en la cámara de combustión de calderas tubulares reducen significativamente las emisiones de CO e hidrocarburos no combustionados al mejorar la mezcla aire–combustible. Por su parte, Pérez et al. (2021) identificaron que las principales pérdidas de eficiencia en calderas se deben al calor evacuado en los gases de combustión (7,38 %) y en los hidrocarburos no quemados (0,83 %), concluyendo que la optimización del aire de combustión puede elevar la eficiencia de 80 % a 83 %.

En este contexto, se evaluó el desempeño de la caldera pirotubular Fulton fuel-fired boiler de Maquita Agro utilizando mezclas al 5, 10 y 20% de biodiésel-diésel. Los resultados experimentales evidenciaron una disminución significativa de las emisiones de $SO_x$ respecto al diésel puro, sin una reducción apreciable en la eficiencia térmica del sistema. Estos hallazgos coinciden con la literatura científica, que destaca la compatibilidad del biodiésel con calderas pirotubulares y su potencial para contribuir tanto a la mitigación de emisiones como a la reducción de la dependencia del diésel fósil en procesos industriales (Komariah et al., 2013). En la Figura 1 se presenta un diagrama esquemático del sistema de generación de vapor, en donde se evidencia la utilización de la mezcla de biodiésel-diésel y los diferentes procesos que funcionan con vapor.

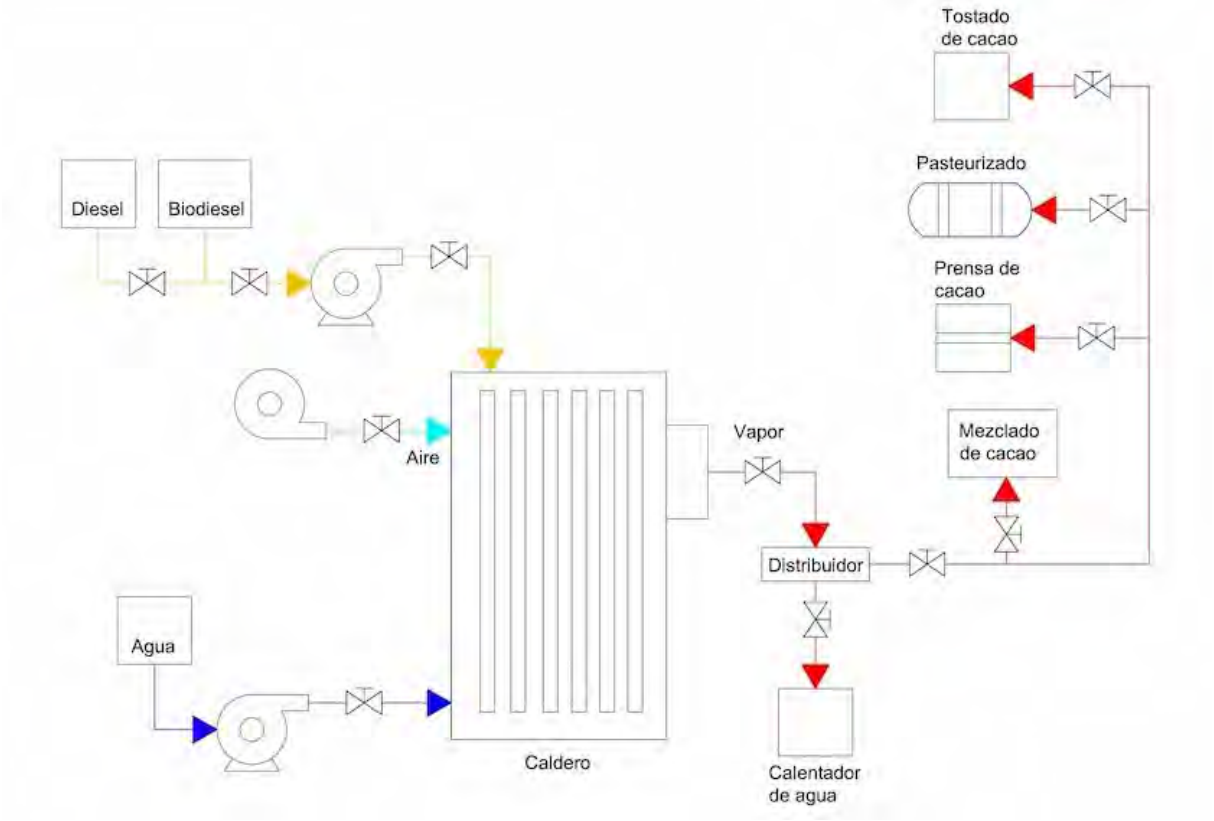



*Figura 1 Diagrama esquemático del sistema de generación de vapor, y la operación con la mezcla de biodiesel – diésel.*

## 2. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

### 2.1. Lugar de estudio.

El presente estudio se llevó a cabo en la planta de procesamiento de cacao de la organización Maquita Agro ubicada en la provincia del Guayas, Ecuador (2°07'10.6"S 79°56'51.5"W).

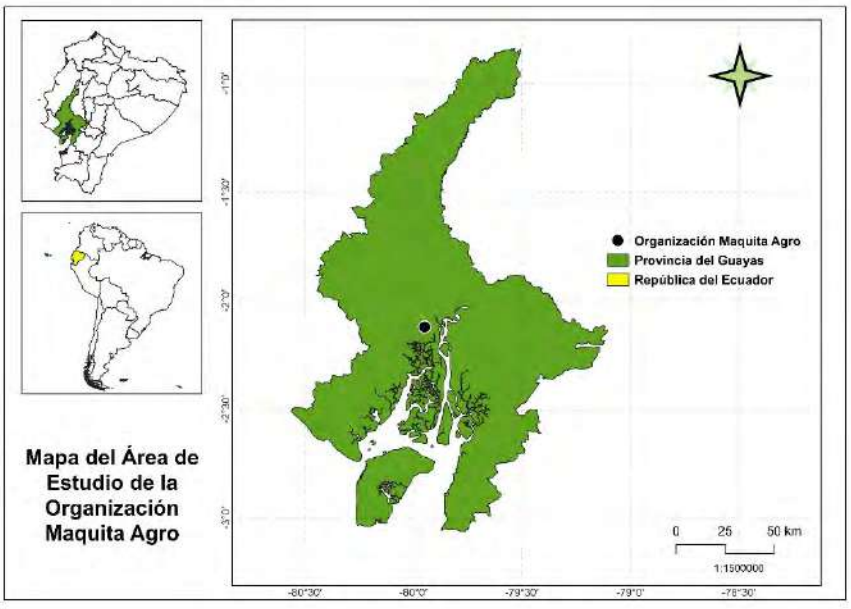



*Figura 2 Ubicación geográfica del lugar de estudio.*

### 2.1. Especificaciones técnicas de la caldera.

Para la generación de vapor se utiliza una caldera pirotubular Fulton Fuel-Fired Boiler VMP-60 (Vertical Multi-Port) con las características presentadas en la tabla 1, la misma suministra de vapor en los procesos de tostado, prensado de la semilla de cacao, pasteurizado del licor de cacao y en el calentamiento de agua la cual es utilizada para calentar líneas y mejorar la fluidez del licor de cacao.

*Tabla 1 Especificaciones técnicas de la caldera*

| Modelo | **VMP-60** |
|---|---|
| Generación de vapor | 60 BHP |
| Presión máxima | 150 psi |
| Temperatura máxima de diseño | 185°C |
| Eficiencia térmica máxima | 84% |
| Calidad de vapor | >99% |
| Ratio de modulación | 8:1 |
| Capacidad de agua de operación | 927L |
| Consumo de combustible (diesel #2) | 64,8L*$h^{-1}$ |
| Área de calefacción efectiva | 66,2 $m^2$ |
| Peso operativo | 4,3 ton |

La caldera está diseñada para operar con múltiples combustibles, entre ellos diésel, gas natural, propano, dual fuel y biofuel, lo que la hace apta para la experimentación con mezclas de biodiesel-diésel.

### 2.2. Procedimiento experimental.

La experimentación se realizó durante la fase de encendido de la caldera, para lo cual se utilizó como base diésel #2 (D), al cual se adicionaron proporciones controladas de biodiésel de palma africana, para obtener las mezclas con relaciones al 5% (BD1), 10% (BD2) y 20% (BD3) de biodiésel-diésel.

La composición, temperatura y flujo de las emisiones gaseosas fueron analizadas con un analizador de gases de combustión TESTO 350 en la chimenea de la caldera, las condiciones del aire de suministro de se midieron utilizando un Anemómetro Sper Scientific 850070 y finalmente para las mediciones de las temperaturas en superficies, líneas de vapor y otros puntos del sistema se utilizó una cámara termográfica Fluke FLK-Ti125.

Todos los ensayos se realizaron por duplicado para aumentar la precisión y validez de los resultados.

### 2.2. Cálculo de eficiencia por método indirecto

Las ecuaciones objeto de este estudio fueron tomadas de (Krishnanunni et al., 2012)

Porcentaje de pérdida de calor en los gases de combustión secos.

$$\%\,\boldsymbol{perdida\ G.C.S} = \frac{m*cp*(T_F - T_a)*100}{PCI\ del\ combustible} \qquad (1)$$

Porcentaje de pérdida de calor por evaporación de agua debido a la presencia de H2 en el combustible.

$$\%\,\boldsymbol{pérdida\ E.A.} = \frac{9*H_2*\left(2452.8+C_p*(T_f - T_a)\right)*100}{PCI\ del\ combustible} \qquad (2)$$

Porcentaje de pérdida de calor debido a la purga.

$$\%\,\boldsymbol{pérdida\ por\ purga} = \frac{m_s*0.02*h_s*100}{m_f*CV} \qquad (3)$$

Porcentaje de pérdida de calor debido al combustible no quemado.

$$\%\ \boldsymbol{pérdida\ por\ C.N.Q} = \frac{CO(en\ ppm)*10^{-6}*m_f*23746.8*28*100}{PCI\ del\ combustible} \quad (4)$$

Porcentaje de pérdida de calor debido a la humedad en el aire

$$\%\ \boldsymbol{pérdida\ H.A.} = \frac{AAS*humedad*Cp*(T_f-T_a)*100}{PCI\ del\ combustible} \quad (5)$$

Porcentaje de pérdida de calor debido a la humedad en el combustible

$$\%\ \boldsymbol{pérdida\ H.C.} = \frac{M*(2452.8+Cp*(T_f-T_a))*100}{PCI\ del\ combustible} \quad (6)$$

Eficiencia neta de la caldera

$$.\boldsymbol{\eta_{indirecta}} = 100 - \sum pérdidad\ (\%) \quad (7)$$

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Eficiencia energética.

Los resultados obtenidos se observan en la tabla 2 y gráfica e, en donde se evidencia que la sustitución parcial de diésel por biodiésel en mezclas BD1, BD2 y BD3 provoca una disminución marginal de la eficiencia térmica, pasando de 80,41 % con diésel fósil a 78,15 % con la mezcla BD20. Esta reducción, aunque ligera, es consistente con lo reportado en la literatura, donde se atribuye al menor poder calorífico del biodiésel y a su mayor contenido de oxígeno y humedad, factores que incrementan el consumo específico de combustible (Ghorbani et al., 2011; Heravi et al., 2015).

*Tabla 2 Análisis de eficiencias para cada combustible*

| Muestra | D | BD1 | BD2 | BD3 |
|---|---|---|---|---|
| **Porcentaje de pérdida de calor en los gases secos de combustión** | 7,23 ± 0,54 | 7,89 ± 0,15 | 7,55 ± 0,05 | 7,4 ± 0,37 |
| **Porcentaje de pérdida de calor por evaporación del agua debido a la presencia de $H_2$ en el combustible** | 8,66 ± 0,01 | 8,76 ± 0,04 | 8,79 ± 0 | 8,8 ± 0,10 |
| **Porcentaje de pérdida de calor debido a la purga (blowdown)** | 0,45 ± 0,04 | 0,47 ± 0 | 0,47 ± 0 | 0,47 ± 0 |
| **Porcentaje de pérdida de calor por combustible no quemado** | 0,04 ± 0,01 | 0,04 ± 0,01 | 0,05 ± 0,02 | 0,01 ± 0 |
| **Porcentaje de pérdida de calor por la humedad en el aire** | 0,06 ± 0 | 0,06 ± 0,01 | 0,07 ± 0 | 0,06 ± 0 |
| **Porcentaje de pérdida de calor por la humedad en el combustible** | 0,14 ± 0 | 0,63 ± 0 | 1,13 ± 0 | 2,11 ± 0,02 |
| **Porcentaje de pérdida debido a la radiación** | 1 | 1 | 1 | 1 |
| **Porcentaje de pérdidas no contabilizadas** | 2 | 2 | 2 | 2 |
| **Total de pérdidas** | 19,59 ± 0,58 | 20,85 ± 0,17 | 21,06 ± 0,02 | 21,85 ± 0,49 |
| **Eficiencia** | 80,41 ± 0,58 | 79,15 ± 0,17 | 78,94 ± 0,02 | 78,15 ± 0,49 |

El análisis de pérdidas de calor revela que las fracciones más representativas corresponden a los gases secos de combustión (7,23–7,89 %) y a la evaporación del agua generada por el hidrógeno del combustible (8,66–8,80 %). Estos resultados coinciden con lo observado por Ghorbani et al. (2011) y Heravi et al. (2015), quienes destacan que el mayor contenido de oxígeno y humedad en el biodiésel incrementa las pérdidas térmicas, haciendo necesario un control adecuado del exceso de aire para minimizar la reducción en eficiencia. No obstante, el parámetro con mayor variación entre las mezclas es la humedad presente en el combustible, que se incrementa en proporción al contenido de biodiésel, tal como lo documentan Komariah et al. (2013).

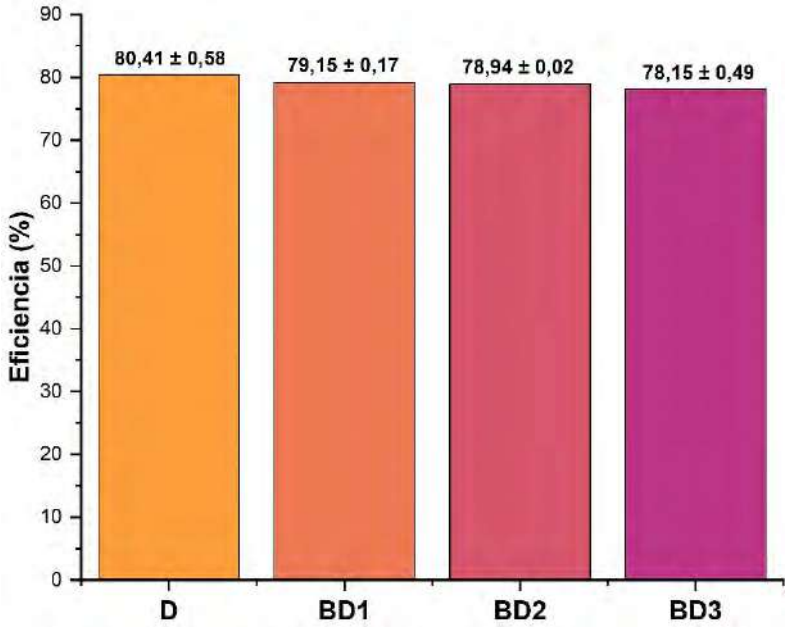



*Figura 3 Eficiencia energética.*

Cabe destacar que la pérdida por combustible no quemado se mantuvo baja en todas las condiciones (0,01–0,05 %), lo que demuestra que las condiciones de atomización e inyección fueron adecuadas para garantizar una combustión completa aun en mezclas con mayores porcentajes de biodiésel. Este comportamiento coincide con lo reportado por Ghorbani et al. (2011) y Aydin y Boke (2010), quienes demostraron que el uso de biodiésel en calderas experimentales no compromete la estabilidad de la llama ni la completitud de la combustión bajo condiciones de operación controladas.

### 3.2. Emisiones de gases de combustión del caldero

Desde el punto de vista ambiental, los ensayos confirmaron una reducción progresiva de las emisiones de óxidos de azufre ($SO_2$) en las mezclas con biodiésel respecto al diésel fósil, Figura 4, lo que se atribuye a la ausencia de compuestos sulfurados en los FAMEs que constituyen el biodiésel. Este comportamiento ha sido documentado previamente en calderas tubulares y hornos experimentales, donde el uso de biodiésel eliminó prácticamente las emisiones de azufre en comparación con diésel convencional (Heravi, Hosseini, Bamoharram, & Baharara, 2015).

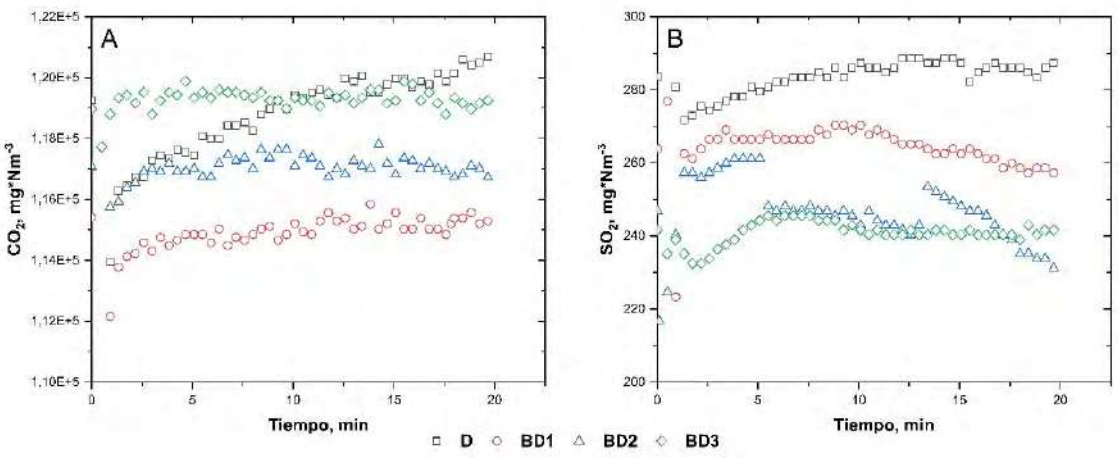



*Figura 4 Diagrama de gases: A) emisiones gaseosas de $CO_2$ y B) emisiones gaseosas de $SO_2$*

En relación con el dióxido de carbono ($CO_2$), los resultados mostraron una ligera disminución en las mezclas bajas (BD1–BD2), seguida de una estabilización en BD3, lo que sugiere que un mayor contenido de biodiésel no asegura beneficios adicionales. Resultados similares fueron reportados por Ghorbani et al. (2011), quienes observaron que proporciones moderadas de biodiésel en calderas experimentales mejoraban la calidad de la combustión y reducían parcialmente las emisiones de $CO_2$, aunque con tendencia a estabilizarse en concentraciones más altas.

En cuanto a otros contaminantes no medidos en este estudio, la literatura indica que el biodiésel suele reducir las emisiones de CO, HC y material particulado, debido a su mayor contenido de oxígeno y a una combustión más completa (Aydin & Boke, 2010). Sin embargo, los efectos sobre los óxidos de nitrógeno (NOx) son más variables: algunas investigaciones han reportado incrementos asociados al aumento de temperatura de llama, mientras que otros estudios señalan reducciones cuando se optimiza la relación aire–combustible o la atomización del combustible (Abu-Hamdeh, Bantan, Alimoradi, & Pourhoseini, 2020).

Los resultados obtenidos también refuerzan la importancia del ajuste operativo de la caldera. El mantenimiento de bajas pérdidas por combustible no quemado indica que la atomización e inyección fueron adecuadas, garantizando estabilidad de llama y combustión completa incluso en mezclas con mayores porcentajes de biodiésel. Este hallazgo es consistente con lo señalado por Allawi y Saleh (2023), quienes demostraron que el diseño de inyección y las condiciones de operación tienen un papel decisivo para asegurar la eficiencia y reducir emisiones en calderas con biodiésel.

En conjunto, los datos muestran que las mezclas bajas y medias (BD1, BD2 yBD3) logran el mejor equilibrio entre reducción significativa de $SO_2$ y mantenimiento de una combustión eficiente, con disminuciones de $CO_2$ respecto al diésel puro. Esto coincide con los resultados de Vershinina, Romanov, Dorokhov, Khomutov y Strizhak (2025), quienes identificaron que proporciones del 5–10 % de bioaditivos permiten mejorar el balance entre eficiencia energética, calidad de combustión y reducción de la huella de carbono en sistemas de calderas y motores.

Por lo tanto, la adopción de mezclas bajas y medias de biodiésel no solo constituye una alternativa ambientalmente favorable, sino que también resulta técnicamente viable en la agroindustria, siempre que se acompañe de medidas de optimización como el control del exceso de oxígeno y la recuperación de calor en los gases de combustión.

## 3. CONCLUSIONES.

La caldera Fulton VMP-60 alcanzó una eficiencia del 80,41 % con diésel puro, mientras que las mezclas de biodiésel BD5, BD10 y BD20 mostraron una ligera reducción de eficiencia hasta el 78,15 %, resultado consistente con lo señalado por Ghorbani et al. (2011) y Heravi et al. (2015), quienes atribuyen esta pérdida al menor poder calorífico y al mayor contenido de oxígeno y humedad del biodiésel. De forma similar, Komariah et al. (2013) reportaron que el biodiésel de palma, pese a aumentar el consumo de combustible, mantiene la estabilidad de la combustión y un desempeño operativo aceptable en calderas tubulares.

En cuanto a emisiones, el uso de biodiésel redujo de manera significativa los óxidos de azufre (SOx) gracias a la ausencia de compuestos sulfurados en los FAMEs, lo que confirma lo documentado por Lin y Wu (2023), Rajendran, Ganesan y Anandkumar (2020) y Heravi et al. (2015). Este hallazgo consolida al biodiésel como una alternativa ambientalmente favorable para el sector agroindustrial. Asimismo, se registraron ligeras reducciones en $CO_2$ en las mezclas bajas, lo que concuerda con los resultados de Aydin y Boke (2010) y Ghorbani et al. (2011), quienes asociaron este comportamiento con una combustión más completa en presencia de oxígeno adicional en el combustible.

Las principales pérdidas de calor se asociaron a los gases secos de combustión y a la evaporación del agua del hidrógeno, en concordancia con lo reportado en evaluaciones experimentales de eficiencia en calderas (Krishnanunni, Paul, Potti, & Mathew, 2012; Allawi & Saleh, 2023). Para mitigar estas pérdidas, la literatura recomienda el ajuste del exceso de aire y la optimización de la atomización, estrategias que permiten reducir el CO y mejorar la eficiencia térmica global (Abu-Hamdeh, Bantan, Alimoradi, & Pourhoseini, 2020; Allawi & Saleh, 2023).

Finalmente, los resultados de Vershinina, Romanov, Dorokhov, Khomutov y Strizhak (2025) refuerzan lo encontrado en este estudio: las mezclas bajas de biodiésel (5–10 %) representan el mejor trabajo entre eficiencia, reducción de emisiones y costo, mejorando además la relación $CO_2$/CO como indicador de combustión más eficiente. En consecuencia, se recomienda la adopción de mezclas BD5–BD10 en la agroindustria del cacao ecuatoriano, complementada con la relación de oxígeno y recuperación de calor en los gases de combustión, como una estrategia técnica y ambientalmente sostenible que reduce la dependencia del diésel fósil y contribuye al cumplimiento de metas de mitigación del cambio climático.

## 4. REFERENCIAS.


Abu-Hamdeh, N. H., Bantan, R. A. R., Alimoradi, A., & Pourhoseini, S. H. (2020). Effect of injection pressure on performance and emission characteristics of a diesel engine using biodiesel B20 blend. Fuel, 278, 118174. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118174

Allawi, M. K., & Saleh, F. A. (2023). Experimental assessment of the impact of biodiesel blends and methanol on emissions and performance in a semi-industrial boiler. Ecological Engineering & Environmental Technology, 25(1), 115–126. https://doi.org/10.12912/27197050/174289

Al-Omari, S. A. B., Ala'a, M., Khasawneh, M., Alkhawaldeh, B. Y., & Alalawin, A. (2021). Diesel-fired boiler performance and emissions measurements using a combination of diesel and palm biodiesel. Energy Conversion and Management, 240, 114265. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114265

Aydin, H., & Boke, Y. E. (2010). Reducing CO emissions in a fire-tube boiler through combustion chamber modifications. Applied Energy, 87(12), 3694–3700. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.019

Ghorbani, A., Bazooyar, B., Shariati, A., Jokar, S. M., Ajami, H., & Naderi, A. (2011). A comparative study of combustion performance and emission of biodiesel blends and diesel in an experimental boiler. Applied Energy, 88(12), 4725–4732. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.016

Heravi, H., Hosseini, S., Bamoharram, F., & Baharara, J. (2015). The effect of various vegetable oils on pollutant emissions of biodiesel blends with gasoil in a furnace. Thermal Science, 19(6), 1977–1984. https://doi.org/10.2298/TSCI140218022H

Islam, M. M., Rahman, M. M., Hasan, M. H., & Satyanarayana, M. (2020). Environment-friendly biodiesel/diesel blends for improving the exhaust emission and engine performance to reduce the pollutants emitted from transportation fleets. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(11), 3896. https://doi.org/10.3390/ijerph17113896

Komariah, L. N., Arita, S., Novia, S., Wirawan, S. S., & Yazid, M. (2013). Effects of palm biodiesel blends on fuel consumption in fire tube boiler. Applied Mechanics and Materials, 391, 93–97. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.391.93

Komariah, L., & Marwani, M. (2016). Boiler Retrofit for the Utilization of Biodiesel. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, *6*, 116. https://doi.org/10.18517/ijaseit.6.1.679

Krishnanunni, S., Paul, J., Potti, M., & Mathew, E. M. (2012). Evaluation of heat losses in fire tube boiler. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2(12), 301–305.

Lin, K. W., & Wu, H. W. (2023). Emissions and energy/exergy efficiency in an industrial boiler with biodiesel and other fuels. Case Studies in Thermal Engineering, 50, 103474. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103474

Pérez, A., Carvajal, J. C., & Bonilla, A. (2021). Automation of the burner of a pirotubular boiler to improve the efficiency in the generation of steam. Journal of Physics: Conference Series, 1708, 012023. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1708/1/012023

Rajendran, S., Ganesan, P., & Anandkumar, G. (2023). A comparative assessment on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled by juliflora biodiesel-diesel blends. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, *21*(1), 257–269. https://doi.org/10.1080/14484846.2020.1842294

Rikolto. (2023). *Projects | Strengthening the cocoa sector in Ecuador*. https://www.rikolto.org/projects/strengthening-cocoa-sector-ecuador

Sentunuhady, J., Atmaja, G. P. S. G., & Muflikhun, M. A. (2021). Biofuel as an alternative energy: A review on the current status and future perspectives. Journal of Engineering Science and Technology Review, 14(4), 119–134.

Statista. (2024). *Production volume of cocoa beans in Ecuador from 2014 to 2023*. https://www.statista.com/statistics/497880/production-of-cocoa-beans-in-ecuador/

TrendEconomy. (2024). *Ecuador | Exports | Cocoa beans | 2023*. https://trendeconomy.com/data/export_h2/Ecuador/1801

Tridge. (2025). *Ecuador Cocoa Bean: Suppliers & Market Trends*. https://www.tridge.com/tridge-woods/cocoa-bean/EC

Vershinina, K., Romanov, D., Dorokhov, V., Khomutov, N., & Strizhak, P. (2025). Mixtures of diesel fuel and liquid bioadditives for boilers and engines: basic operational and energy indicators. *Clean Technologies and Environmental Policy*. https://doi.org/10.1007/s10098-025-03304-8

**Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), por el financiamiento otorgado a través de la subvención dineraria expediente no. 2023QdV00248; a la Fundación Maquita, por su valiosa colaboración; y al Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), como entidad ejecutora del proyecto. Asimismo, se reconoce de manera especial el apoyo brindado por el Ing. Óscar Estévez, funcionario del IIGE, en la elaboración de los planos (P&ID).

# GESTIÓN AMBIENTAL DIGITAL EN LA INDUSTRIA ACEITERA: UN MODELO METODOLÓGICO BASADO EN RAMI 4.0

Torres Carolina; Voisard, Brenda; Nadalutti Luis; Querini, Pedro L.; Fernández, Erica

*Facultad Regional Rafaela – Universidad Tecnológica Nacional*

*carolina.torrez@frra.utn.edu.ar; voisardbrenda@gmail.com; pedroquerini@gmail.com; erica.fernandez@frra.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

La industria aceitera argentina enfrenta crecientes desafíos ambientales vinculados con el consumo de agua, el tratamiento de efluentes y la gestión de residuos. En este trabajo se presenta la implementación de un sistema ciber-físico modular en una pyme aceitera de Santa Fe, diseñado bajo el marco RAMI 4.0 para digitalizar la gestión ambiental. La metodología incluyó el mapeo de tres ejes —agua, efluentes y residuos— dentro de las capas de RAMI 4.0, desde sensores IoT y registros de planta hasta la integración de tableros en Power BI. Este enfoque permitió estandarizar datos, generar indicadores en tiempo real y articular información con áreas clave como producción, mantenimiento, compras y finanzas. Los resultados evidencian mejoras en el control de consumos, detección temprana de anomalías y planificación preventiva. En efluentes, la integración de caudal y pH contribuyó a la estabilidad operativa y a reducir riesgos normativos. En residuos, se identificó la relevancia de las tierras de blanqueo y la necesidad de estrategias de valorización. En síntesis, la digitalización ambiental se revela factible para pymes con recursos limitados, aportando eficiencia, trazabilidad y capacidad predictiva. El modelo propuesto constituye una experiencia replicable para el sector agroindustrial y manufacturero.

**Palabras Claves: Digitalización ambiental, Industria 4.0, IoT, Power BI, RAMI 4.0**

**ABSTRACT**

The Argentine oilseed industry faces increasing environmental challenges related to water consumption, effluent treatment, and waste management. This paper presents the implementation of a modular cyber-physical system in a soybean oil SME located in Santa Fe, designed under the RAMI 4.0 framework to digitalize environmental management. The methodology involved mapping three key axes—water, effluents, and waste—within RAMI 4.0 layers, from IoT sensors and plant records to the integration of dashboards in Power BI. This approach enabled data standardization, real-time indicators, and the articulation of information across critical areas such as production, maintenance, procurement, and finance. Results highlight improvements in consumption control, early anomaly detection, and preventive planning. In effluents, the integration of flow and pH contributed to operational stability and reduced regulatory risks. In waste management, bleaching earth was identified as a critical stream, reinforcing the need for valorization strategies. In summary, environmental digitalization proves feasible for SMEs with limited resources, providing efficiency, traceability, and predictive capacity. The proposed model constitutes a replicable experience for the agro-industrial and manufacturing sectors.

**Keywords: Environmental digitalization, Industry 4.0, IoT, Power BI, RAMI 4.0**

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria aceitera ocupa un rol central en la matriz productiva argentina, aportando de manera significativa al desarrollo económico, a la generación de empleo y a la inserción del país en los mercados internacionales. Sin embargo, este sector enfrenta desafíos crecientes vinculados a la gestión eficiente de recursos hídricos, al tratamiento de efluentes y a la disposición responsable de residuos industriales. La presión regulatoria, las demandas de sostenibilidad de los mercados internacionales y la necesidad de reducir costos operativos sitúan a la gestión ambiental en un lugar estratégico dentro de la planificación y operación de estas industrias (Amirova, Garbuzova, & Gazieva, 2024).

En este contexto, las pequeñas y medianas empresas (pymes) presentan mayores dificultades para adoptar tecnologías avanzadas, dado que suelen operar con recursos financieros y humanos limitados, lo que incrementa la brecha tecnológica frente a grandes corporaciones. La transformación digital ofrece un camino concreto para superar estas restricciones, habilitando esquemas de monitoreo y control basados en datos que incrementan la transparencia, la eficiencia y la capacidad de toma de decisiones (Luna-López et al., 2021).

El marco, la RAMI 4.0 (Reference Architectural Model for Industry 4.0), Figura 1, constituye una referencia conceptual que facilita la convergencia entre el mundo físico y el digital, estructurando la información desde el nivel de sensores y equipos de campo hasta las capas de negocio y decisión estratégica. Su aplicación a la gestión ambiental permite trascender la simple recopilación de datos, habilitando procesos de estandarización, integración y análisis que potencian la capacidad de las organizaciones para anticipar riesgos, optimizar recursos y garantizar el cumplimiento normativo (Melo, Godoy, Ferrari, & Sisinni, 2021; Riedmann, Binder, & Neureiter, 2024).

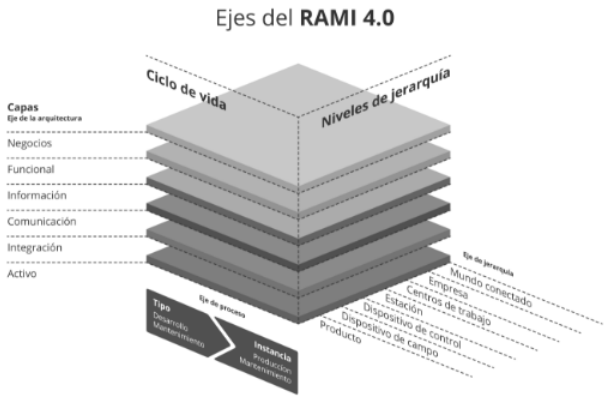



*Figura 1. Arquitectura de referencia RAMI*

El trabajo presentado se focaliza en una pyme aceitera ubicada en Franck, provincia de Santa Fe, donde se diseñó e implementó un sistema ciber-físico modular destinado a la gestión integrada de tres ejes ambientales: agua, efluentes y residuos. La arquitectura construida bajo RAMI 4.0 permitió no solo digitalizar variables clave de cada eje, sino también articular la información resultante con distintas áreas de la empresa, tales como producción, mantenimiento, calidad, logística, seguridad, finanzas y recursos humanos.

El impacto principal de esta experiencia radica en demostrar que es posible trasladar el paradigma de la Industria 4.0 a empresas de tamaño medio con soluciones tecnológicas de bajo costo y alta adaptabilidad. La digitalización ambiental, implementada de manera modular y escalable, permitió a la empresa disponer de indicadores en tiempo real, optimizar el consumo de agua, mejorar la estabilidad de la planta de tratamiento de efluentes y sistematizar la gestión de residuos. Asimismo, la articulación con otros sectores habilitó la creación de tableros de control integrados en Power BI, favoreciendo la mejora continua y la trazabilidad de decisiones operativas y estratégicas (Wright & Wernecke, 2020).

La contribución del trabajo se manifiesta en tres dimensiones principales:

- **Metodológica**, al aplicar la arquitectura RAMI 4.0 como marco de referencia para estructurar la gestión ambiental digital en una pyme industrial.
- **Tecnológica**, al desarrollar un sistema ciber-físico modular que integra sensores, PLCs, bases de datos locales y tableros en la nube, demostrando su factibilidad en un entorno real.

- **Práctica**, al evidenciar que la digitalización ambiental no solo mejora la eficiencia de los procesos productivos, sino que además fortalece la sostenibilidad empresarial, la competitividad y el cumplimiento normativo.

De este modo, el presente trabajo busca aportar evidencia empírica sobre el potencial de la digitalización para transformar la gestión ambiental en pymes industriales, proponiendo un modelo replicable y escalable que puede ser adoptado por otras organizaciones del sector agroindustrial y manufacturero en general.

## 2. DIGITALIZACIÓN AMBIENTAL BAJO RAMI 4.0

### 2.1. MARCO DE REFERENCIA

La RAMI 4.0 constituye una referencia estandarizada para la representación de sistemas productivos digitales. Su estructura en capas permite mapear la información desde el nivel físico de los activos hasta la toma de decisiones estratégicas, facilitando la integración entre procesos, datos y áreas de la organización. En este trabajo se adopta RAMI 4.0 como marco metodológico debido a su capacidad de ordenar la gestión ambiental bajo un esquema sistemático, escalable y alineado con los principios de la Industria 4.0. La elección se justifica por la necesidad de trascender el registro aislado de variables ambientales y avanzar hacia una articulación integral de la información que soporte la mejora continua.

La Figura 2 muestra la lógica de esta arquitectura aplicada a la gestión ambiental digital. El esquema representa cómo distintos ejes o dimensiones ambientales pueden estandarizarse bajo RAMI 4.0 y confluir en un dashboard centralizado. De este modo, se garantiza que la información recolectada, independientemente de su origen, pueda integrarse de manera coherente, ser procesada con uniformidad y transformarse en indicadores útiles para la toma de decisiones estratégicas en materia ambiental.

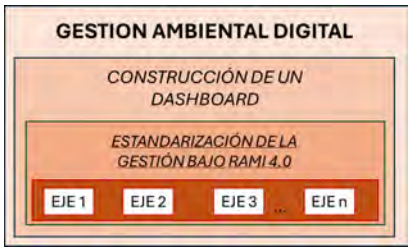



*Figura 2. Articulación de ejes ambientales en la gestión digital según RAMI 4.0*

### 2.2. DEFINICIÓN DE EJES AMBIENTALES

La definición de los ejes ambientales se realizó de manera estratégica en función de la disponibilidad de datos y la criticidad de los impactos asociados. Se identificaron tres ejes centrales: **agua**, **efluentes** y **residuos**, que abarcan las principales interacciones de la empresa con el entorno y concentran los mayores requerimientos normativos y de gestión. Cada eje constituye un activo dentro de la arquitectura RAMI 4.0 y representa un punto de partida para estandarizar la información y generar indicadores confiables. La selección de estos ejes permite focalizar esfuerzos en aspectos clave de la sostenibilidad, garantizando al mismo tiempo la viabilidad técnica de la digitalización en una pyme industrial.

### 2.3. MAPEO DE CAPAS EN RAMI 4.0

Cada eje ambiental fue representado dentro de la estructura RAMI 4.0, asegurando su progresiva integración desde el nivel físico hasta la capa de negocio. La adaptación metodológica se organizó del siguiente modo:

- **Asset layer (activos):** corresponde al nivel físico de captación de datos. Incluye caudalímetros electromagnéticos para agua y efluentes, sondas de pH en línea, básculas digitales para residuos y celdas de carga en tanques de insumos químicos. Estos dispositivos constituyen la base tangible del sistema, ya que transforman los fenómenos ambientales en señales medibles.
- **Integration y Communication layer (integración y comunicación):** en este nivel, los datos generados por los sensores se transmiten mediante protocolos estándar de la Industria 4.0 como OPC UA y MQTT. Los PLCs actúan como nodos de consolidación, procesando las

señales en tiempo real y garantizando su interoperabilidad. La infraestructura asegura la conectividad entre el mundo físico y los sistemas digitales de la organización.

- **Information layer (información):** los datos recolectados se almacenan en servidores locales y se estructuran en bases SQL, lo que permite consolidar consumos de agua, volúmenes tratados de efluentes y generación de residuos. En esta capa se desarrollan modelos de organización y limpieza de datos, generando series temporales consistentes y comparables.
- **Functional layer (funciones):** a partir de la información procesada, se diseñan reglas de negocio que habilitan la automatización y la predicción. Por ejemplo, el cálculo de indicadores de consumo por lote, la estimación de cobertura de insumos químicos o la activación de alertas tempranas ante valores anómalos de pH. Esta capa representa el puente entre el análisis descriptivo y la toma de decisiones operativas.
- **Business layer (negocio):** finalmente, la información es integrada a tableros en Power BI que permiten monitorear indicadores clave de desempeño, tanto ambientales como productivos. Esto posibilita articular la gestión ambiental con áreas estratégicas de la empresa, tales como producción, mantenimiento, calidad, logística, finanzas y seguridad. De este modo, los datos ambientales dejan de estar aislados y pasan a formar parte de la planificación organizacional.

Este mapeo de capas asegura **trazabilidad y transparencia**, además de habilitar la escalabilidad del sistema hacia otros procesos industriales.

### 2.4. ARQUITECTURA DEL SISTEMA CIBER-FÍSICO

La arquitectura propuesta se configuró como un sistema ciber-físico modular, compuesto por sensores IoT, PLCs, servidores locales y plataformas de visualización en la nube. Cada eje ambiental posee dispositivos específicos de medición, cuyo flujo de datos se centraliza en un servidor que actúa como hub de información. Desde allí, los datos son procesados y distribuidos hacia tableros de control desarrollados en Power BI, lo que permite contar con indicadores en tiempo real y trazabilidad histórica.

La modularidad del sistema facilita su escalabilidad, posibilitando incorporar nuevos activos o ampliar la cobertura hacia otros procesos sin alterar la estructura de base. Este diseño refuerza la aplicabilidad del modelo en pymes, al equilibrar bajo costo, flexibilidad tecnológica y alineamiento con estándares internacionales. De este modo, se consolida un esquema que no solo responde a las necesidades inmediatas de la empresa, sino que además ofrece un modelo replicable y transferible a otras organizaciones del sector agroindustrial.

## 3. CASO DE ESTUDIO

El trabajo se validó en una PYME aceitera que inicia en el año 2000 como una pequeña empresa familiar que se encuentra radicada en, Frank, provincia de Santa Fe.

La empresa se dedica a la elaboración de Expeller y Aceite Crudo de Soja a través de extrusión y prensado de la materia prima y aceite Refinado de Soja, donde parte de la materia prima es proveniente de la planta propia de extracción. En la actualidad los principales destinos del aceite refinado son usos industriales como base para pinturas, biodiesel, entre otros. Este proceso, además del producto final presenta dos subproductos, Borras de neutralización y Ácidos grasos proveniente del desodorizado, los cuales se comercializan. Durante el proceso productivo se le adiciona Sílice y Tierras de blanqueo de origen natural necesario para obtener un aceite dentro de las especificaciones dadas por la Cámara de Cereales. Las tierras son filtradas y se disponen como Residuo Industrial No Peligroso. Por otro lado, la empresa cuenta servicios auxiliares, como ser sistemas de aire comprimido, enfriamiento de agua a través de torres y generación de vapor a través de calderas humo tubulares. La calidad del agua de consumo y sus purgas son controladas y analizadas mensualmente por empresas externas competentes en las operaciones.

La definición de los ejes se realizó de manera estratégica en función de los datos que se encontraban disponibles durante el relevamiento. La empresa cuenta con tres ejes ambientales desde los cuales se pueden partir para la estandarización de la información bajo la RAMI 4.0 y con la cual se puede construir el dashboard que permite la gestión ambiental. Los ejes de gestión se trazaron en agua, efluentes y residuos.

El agua que se utiliza es agua de pozo cuyas finalidades pueden ser para riego, para algunos sectores de proceso que admiten esa calidad de agua o bien deben retirarse sales mediante un proceso de ablandado con resina de intercambio para que el agua pueda ser utilizada sin causar problemas. El

consumo se mide a través de caudalímetros los cuales mediante pulsos enviados a un módulo de conteo rápido en un PLC pueden establecer el valor de consumo instantáneo y el acumulado en litros por hora (l/h) o en metros cúbicos por hora (m3/h), Figura 3. Esos datos se almacenan en un servidor local desde donde la información puede ser compartida y tomada por los diferentes sectores. Mediante el agrupamiento de datos en Power BI se pueden obtener indicadores de consumo por día, sector y uso.

En el caso del efluente, el sistema de tratamiento está compuesto por un lazo de control el cual en función del caudal de entrada dosifica los químicos al mismo tiempo que monitorea los volúmenes disponible en los tanques de efluente, Figura 3. Esta información es un conjunto de señales 4-20mA que el PLC proceso para el lazo de control, pero además almacena para estimar el caudal instantáneo o acumulado de efluente que se procesa. Al igual que el agua, los datos se almacenan en un servidor local, se comparten mediante la nube y son tomados por un Power BI de gestión ambiental el cual sirve para obtener indicadores de procesamiento de efluentes diarios, para conocer la cantidad de químico dosificada en el día, para prever si es necesario realizar compras de químicos a futuro y para conocer si los tanques que almacenan el efluente antes de ser tratado están acumulando efluente y llegarán en breve a un estado de rebalse o si, por el contrario, están vaciándose y llegarán a un estado de falta de efluente para procesar. El tratamiento que posee la empresa es una planta de tratamiento de barros activados, un proceso microbiológico que necesita la mayor estabilidad posible para que la eficiencia sea máxima, por lo que una interrupción en el suministro de efluente afecta de manera negativa.

En el caso de los residuos, Figura 3, la división principal es entre residuos peligrosos y no peligrosos. En el caso de los residuos peligrosos, la división se da entre residuos peligrosos líquidos, sólidos y del tipo eléctrico electrónico (RAEE). Principalmente los residuos peligrosos líquidos son inflamables, pinturas, solventes y aceites minerales, mientras que los sólidos son todos los papeles cartón o elementos de protección personal que se ensucien con estos líquidos. Los RAEE son principalmente equipos electrónicos en desuso. En el caso de los residuos no peligrosos, se encuentran residuos propios del proceso como tierras de filtrado agotadas y residuos del tipo símil urbano como papel madera cartón, etc. La categoría, subcategoría y el peso se carga en un manifiesto electrónico que es enviado a tratador de los residuos, en paralelo se carga en una hoja de cálculo que se almacena localmente en un servidor. Luego, la información es agrupada en un Power Bi de donde se obtienen los indicadores de generación por fecha.

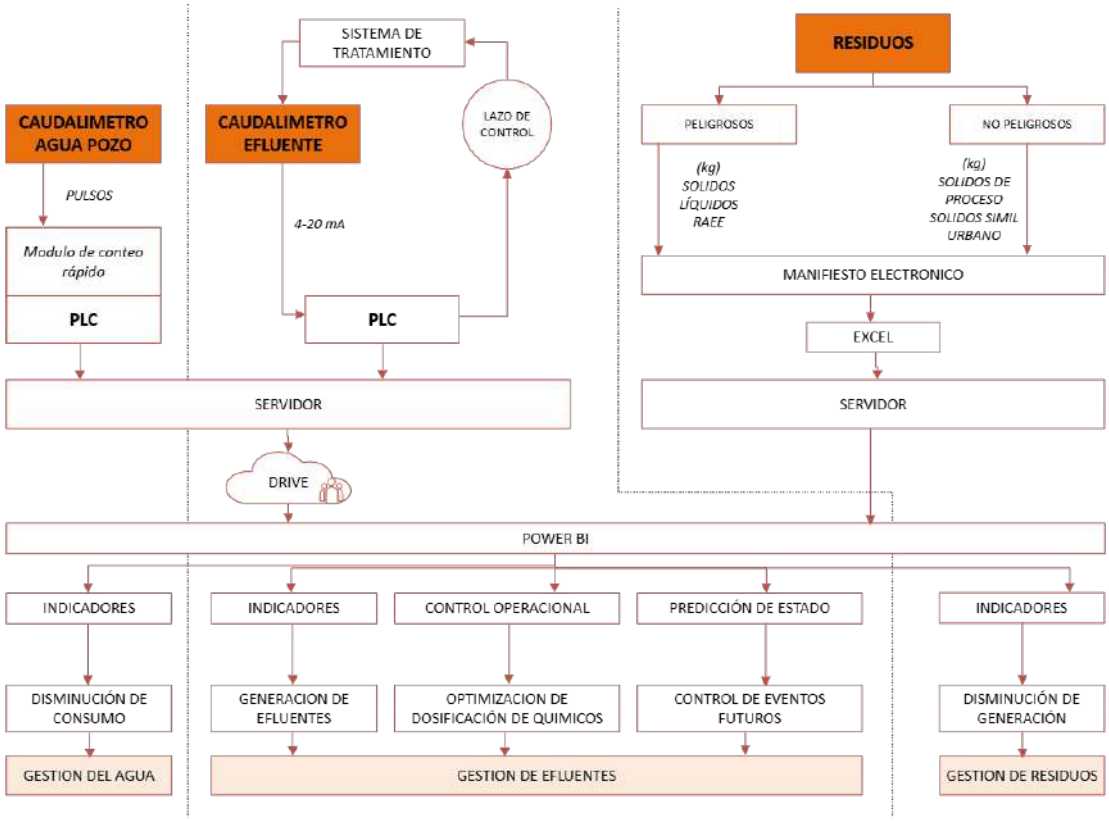



*Figura 3. Lógica del sistema de digitalización aplicado a la gestión ambiental.*

La conformación de las capas de digitalización bajo el estándar RAMI 4.0 queda configurado como lo indica la Figura 4.

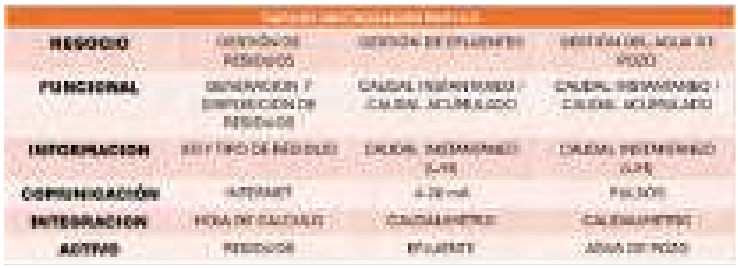



*Figura 4. Capas de digitalización bajo el estándar RAMI 4.0.*

La definición del activo es el componente que permite alcanzar el negocio de manera efectiva. En el activo Agua, la integración la produce el caudalímetro a través de las aspas mecánicas que emiten pulsos por inducción, el cual un contador rápido integrado en un PLC es capaz de leer y procesar la información de los Litros por hora que se producen. Esta información se trabaja como caudal inmediato y como caudal acumulado para la corriente especifica. A partir de esta información se pueden detectar patrones de uso y fugas.

En el caso de efluente, el caudalímetro integra y emite una señal 4-20 mA al PLC el cual, al igual que con el agua, muestra caudal instantáneo y/o acumulado. Como fue mencionado, esta información se usa también para el lazo de control de la planta de tratamiento para que la dosificación de químicos sea adecuada.

En el caso del activo Residuos, la integración de la información se realiza a través de una hoja de cálculo que se transmite a través de internet. La información es propia del tipo de residuo, los kilos y la fecha. La capa de función procesa la generación promedio y los días de la semana donde más se producen.

### 3.1. ARTICULACION DE LA INFORMACION

Con el propósito de trascender el monitoreo aislado de variables ambientales y habilitar mejora continua a nivel organizacional, se adopta la referencia RAMI 4.0 (DIN SPEC 91345) para estructurar la articulación de datos entre la Gestión Ambiental Digital y el resto de los sectores de la planta. Este marco permite describir de manera coherente el recorrido de la información desde la capa Asset (sensores y actuadores) hasta la capa Business (procesos y decisiones), pasando por Integration, Communication, Information y Functional. Sobre esta base, los eventos generados por caudalímetros, sondas de pH y básculas se transforman en información normalizada, reglas de negocio reproducibles y, finalmente, acciones verificables con trazabilidad. La arquitectura implementada actúa como hub de datos para los ejes Agua, Efluentes y Residuos, integrándose con PLC/SCADA, base SQL y tablero en la nube, Figura 5.

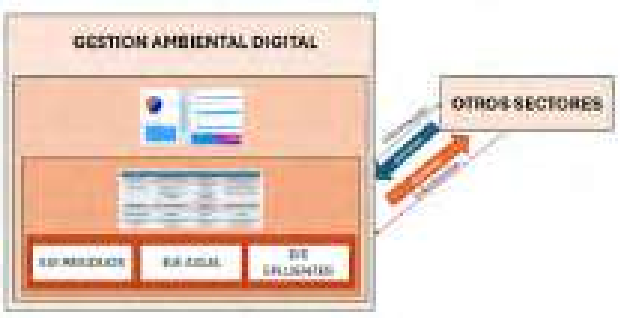



*Figura 5. Selección de indicadores ambientales para la digitalización.*

La articulación de los datos obtenidos en planta con los distintos sectores de la organización constituye un aspecto esencial para transformar la información en una herramienta de gestión ambiental integral. En el área de producción, el registro por lote del caudal de agua en los enjuagues CIP permite identificar consumos superiores al histórico de referencia, lo que posibilita ajustar tiempos de enjuague y detectar

fugas en válvulas o conexiones. Estas acciones no solo contribuyen a reducir el uso de agua por lote, sino que también disminuyen la carga hidráulica y química hacia el sistema de tratamiento de efluentes.

Desde el área de mantenimiento, la relación entre caudal instantáneo de los pozos y consumo eléctrico de las bombas posibilita el seguimiento de la eficiencia energética a través del indicador kWh/m³. La detección temprana de aumentos en este parámetro orienta a programar tareas preventivas en impulsores o rodamientos antes de que se presenten fallas críticas, prolongando la vida útil de los equipos y minimizando las paradas no planificadas.

El laboratorio, por su parte, contribuye al aseguramiento de la calidad del agua ablandada mediante la verificación sistemática de la dureza y la conductividad a la salida del sistema de resinas. Cuando se identifican tendencias de desvío respecto a los valores objetivo, se ajustan los ciclos de regeneración y la dosificación de salmuera, evitando incrustaciones en intercambiadores y garantizando la estabilidad de los procesos industriales que dependen de este insumo.

En el área de compras y almacén, la incorporación de sondas de radar en los tanques de coagulante y floculante permite monitorear de manera continua el nivel de los insumos y calcular su volumen disponible. Con la proyección del consumo semanal, se determinan los días de cobertura, lo cual facilita la planificación de pedidos antes de que los stocks alcancen niveles críticos, reduciendo la probabilidad de quiebres y sobrecostos por adquisiciones de emergencia.

El sector de utilidades se beneficia del cruce de datos de make-up de caldera con el consumo eléctrico. El aumento de agua de aporte sin un incremento proporcional en la producción de vapor constituye un indicador de pérdidas en la recuperación de condensados, lo que activa inspecciones de trampas y sistemas de sellado. El seguimiento de indicadores como kWh por tonelada de vapor y porcentaje de recuperación de condensados permite cuantificar los beneficios energéticos alcanzados.

En logística de residuos, a pesar de que los contenedores no cuentan con sistemas de pesaje continuo, el análisis de la tasa de generación histórica posibilita estimar fechas de retiro más precisas. Este dato se complementa con verificaciones visuales del nivel de llenado realizadas por los operarios, lo que asegura la solicitud oportuna del servicio de recolección y contribuye a optimizar la programación de transporte y a prevenir desbordes.

La gestión de seguridad y medio ambiente se apoya en el tablero digital, que integra indicadores de agua, efluentes y residuos, contrastándolos con los umbrales regulatorios vigentes. Ante la detección de un desvío, se generan automáticamente acciones correctivas y preventivas, mientras que los reportes periódicos permiten a la gerencia disponer de un panorama actualizado del grado de cumplimiento normativo.

Desde el área de finanzas y costos, la conversión de los volúmenes de agua, residuos y energía en indicadores monetarios por centro de costo y turno proporciona un insumo clave para el control presupuestario. De esta manera, se identifican desvíos respecto a lo planificado y se respaldan decisiones de inversión, ajustes operativos o renegociación de contratos de servicios.

El área de recursos humanos utiliza los datos ambientales para identificar necesidades de formación. La consolidación de indicadores de consumo de agua frente a los estándares y del tiempo en que el pH se mantiene dentro de rango por turno permite reconocer patrones de desempeño y planificar capacitaciones específicas, fortaleciendo las competencias del personal en prácticas de operación más eficientes y sostenibles.

Finalmente, el área comercial encuentra en esta digitalización una herramienta estratégica para el acceso a nuevos mercados. La disponibilidad de indicadores verificables de consumo de agua, estabilidad de efluentes y trazabilidad de residuos constituye evidencia objetiva para auditorías de clientes, licitaciones y procesos de certificación. En este sentido, la gestión ambiental digitalizada no solo fortalece la competitividad de la empresa, sino que además le permite posicionarse en cadenas de valor que exigen compromisos crecientes en materia de sostenibilidad.

### 3.2. RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos a partir de la digitalización de los tres ejes ambientales definidos: agua, efluentes y residuos, Figura 6, Figura 7 y Figura 8. Los datos fueron capturados, transmitidos y procesados mediante la arquitectura ciber-física desarrollada, y se visualizaron en tableros dinámicos de Power BI. Se muestran aquí las métricas recolectadas de manera directa con el propósito de ofrecer una visión clara y objetiva del comportamiento de cada eje durante el período analizado.

En el caso del eje agua, la Figura 6 muestra la distribución y evolución del consumo durante el mes de julio. El tablero dinámico incluye registros correspondientes a un período total de un año; sin embargo, se presenta aquí un recorte ilustrativo del mes mencionado. Se observa que la totalidad del consumo proviene de agua subterránea (pozo), la cual se divide en dos corrientes principales: agua dura y agua blanda. La primera se utiliza directamente en riego, pileta barométrica, dársenas y lavado de placas, mientras que la segunda atraviesa un proceso de ablandamiento mediante resinas de intercambio iónico, previo a su empleo en las líneas de refinería y en el laboratorio, donde se requiere remover sales para evitar incrustaciones y asegurar la calidad de los procesos.

En cuanto a la distribución porcentual, el consumo de agua blanda se reparte entre la refinería Este (42,65 %) y la refinería Oeste (42,82 %), mientras que la fracción de agua dura representa el 14,52 % del total registrado. El consumo diario de julio se mantuvo relativamente estable, con valores que oscilaron entre 82 mil y 148 mil litros por día, y un promedio de 110–120 mil litros, alcanzando picos superiores a 140 mil litros en determinadas jornadas. El uso sectorial evidencia que los mayores volúmenes corresponden a los servicios de agua blanda de refinería Este y Oeste, con consumos acumulados de 23,08 y 16,19 millones de litros, respectivamente. En menor medida, se registran los usos vinculados al agua dura destinada a riego, pileta barométrica y lavado de placas (8,27 millones de litros).

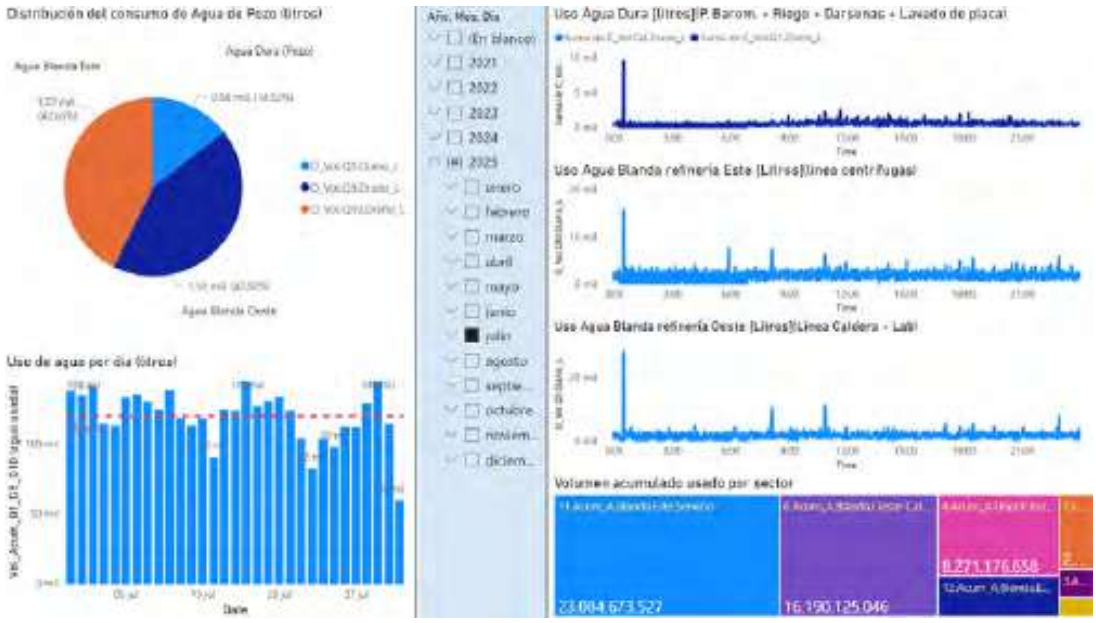



*Figura 6. Distribución y evolución del consumo de agua (julio)*

En relación con el eje efluentes, la Figura 7 ilustra la dinámica del sistema de tratamiento compuesto por tres tanques interconectados. El tanque 2 recibe directamente los efluentes generados en el proceso, principalmente purgas de la pileta barométrica caracterizadas por su acidez debido al arrastre de ácidos grasos. Este tanque descarga automáticamente sobre el tanque 1, que actúa como ecualizador central y acumula también los efluentes de limpieza de pisos y equipos de la refinería. Por su parte, el tanque 3 opera como pulmón para contingencias y suele permanecer con niveles bajos, salvo en los eventos en que recibe descargas cáusticas de los procesos de limpieza CIP.

Los resultados registrados para el mes de julio muestran volúmenes diarios de efluente entre 15 y 46 mil litros, con una tendencia estable en el período. En la Figura 7 puede observarse el comportamiento diferenciado de los tanques: el tanque 2 con mayor actividad de carga y descarga; el tanque 1 en niveles intermedios, centralizando los aportes; y el tanque 3 con valores bajos salvo en eventos específicos. Asimismo, los caudalímetros instalados permiten contrastar la relación entre el efluente generado y el tratado, reflejando en general una correspondencia adecuada, aunque con momentos puntuales en los que la generación superó la capacidad de procesamiento, lo que requirió acumular volúmenes en los tanques. Además, se integró la medición puntual de pH en el tanque 1, junto con el cálculo automático del tiempo de apertura del tanque 3 necesario para ajustar el valor a pH 7. Estos parámetros se complementan con la estimación de horas restantes para que los tanques se vacíen o alcancen su capacidad máxima, lo que aporta trazabilidad y control operativo en tiempo real.

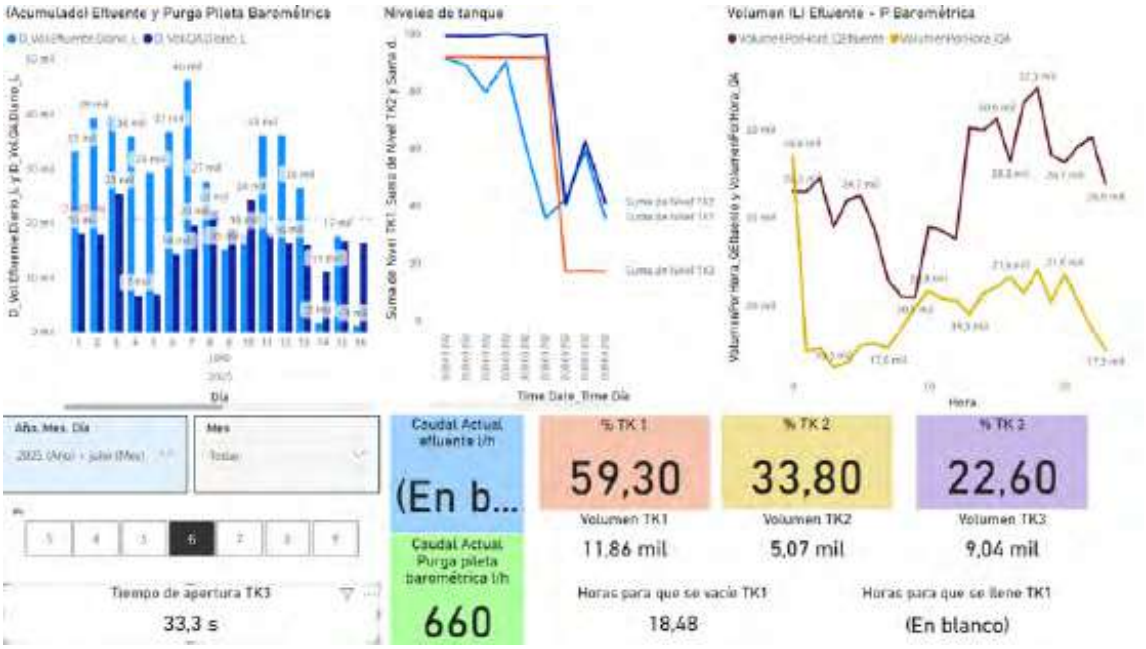



*Figura 7. Dinámica operativa de los tanques del sistema de efluentes.*

Por último, los resultados del eje residuos se muestran en la Figura 8, donde se presenta la distribución y evolución de las corrientes generadas en los últimos años. El gráfico superior izquierdo evidencia que la fracción NP 10 – Tierra mineral constituye el principal componente, con más de 6 millones de kilogramos acumulados, lo que representa aproximadamente el 80 % del total. El resto se distribuye entre lodos (NP 16), efluente cloacal, escombros, residuos asimilables a urbanos y otras fracciones menores. El gráfico superior derecho refleja la cantidad mensual de volquetes de residuos no peligrosos retirados, con valores que se ubican entre 20 y 45 por mes, en función de la actividad productiva. En el gráfico inferior izquierdo se presentan los residuos peligrosos codificados por la provincia de Santa Fe, con variaciones anuales asociadas tanto al nivel de actividad industrial como a las mejoras en clasificación y gestión. Finalmente, el gráfico inferior derecho expone la evolución mensual de los residuos NP 10 – Tierra mineral, con valores que alcanzaron picos de hasta 214 mil kilogramos en julio de 2024, dentro de un rango habitual de 100 a 200 mil kilogramos por mes. Estos registros corresponden principalmente a tierras de blanqueo agotadas, subproducto característico del proceso de refinación de aceites.

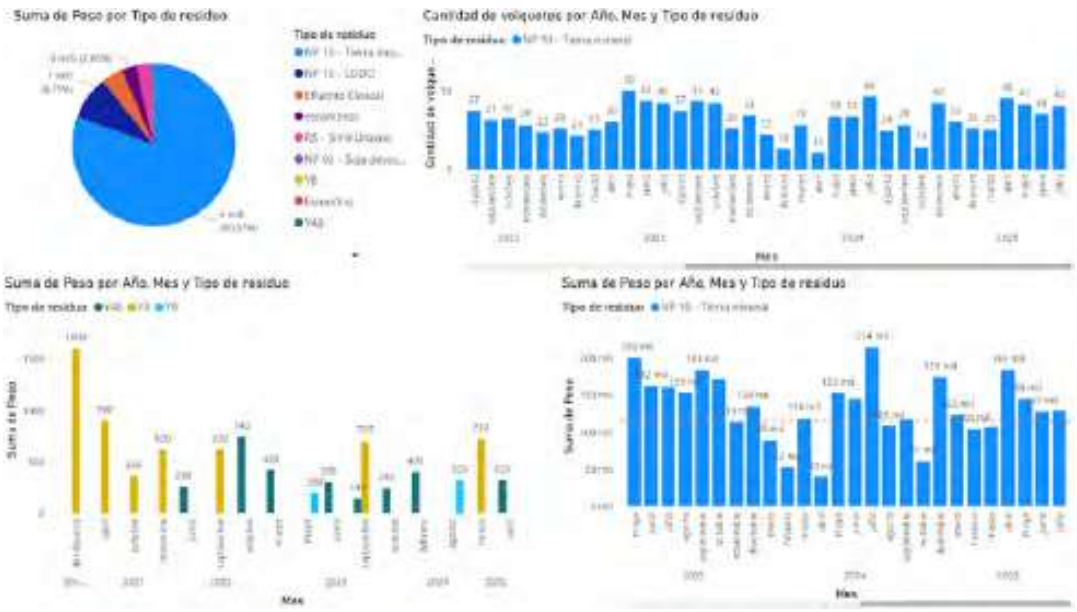



*Figura 8. Generación y distribución de residuos (corrientes NP y no peligrosos)*

### 3.3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

La presente sección se orienta a la interpretación crítica de la información obtenida en los tres ejes ambientales considerados.

En el caso del eje de agua, el análisis de los registros evidencia una marcada dependencia de la planta respecto del agua subterránea tratada, donde más del ochenta y cinco por ciento del volumen total se destina a corrientes que requieren un proceso de ablandamiento mediante resinas de intercambio. Se observa que la operación de este sistema constituye un punto crítico, ya que su eventual falla comprometería la continuidad de los procesos productivos. En términos de estabilidad, la demanda diaria se mantiene en un rango relativamente constante, con una media de 110–120 mil litros. Esta regularidad indica procesos rutinarios bien definidos y ofrece previsibilidad al abastecimiento, facilitando la planificación de mantenimientos preventivos. Sin embargo, la aparición de picos superiores a los 140 mil litros diarios plantea interrogantes sobre sus causas, que podrían estar vinculadas a limpiezas extraordinarias, fugas o ajustes operativos. La detección temprana de estos desvíos mediante el sistema digital constituye una oportunidad de mejora, ya que permite implementar medidas correctivas para reducir pérdidas y aumentar la eficiencia. En este contexto, la digitalización del consumo de agua habilita no solo el monitoreo en tiempo real, sino también la construcción de series históricas capaces de respaldar evaluaciones de tendencia, estimaciones de costos y generación de alertas predictivas. Así, se fortalece la sostenibilidad del recurso y se promueve un uso más racional de la infraestructura asociada.

El seguimiento de los efluentes durante el mes de julio muestra una generación diaria variable, con valores entre 15 y 46 mil litros. A diferencia del consumo de agua, se observa que la descarga responde a eventos de operación más fluctuantes, en particular a purgas de la pileta barométrica y limpiezas de equipos. Esta dispersión evidencia la necesidad de un control más detallado para correlacionar variaciones puntuales con actividades productivas específicas. El comportamiento de los tres tanques confirma la lógica de ecualización prevista: el tanque 2 presenta mayor actividad, el tanque 1 se desempeña como regulador intermedio y el tanque 3 recibe descargas cáusticas asociadas a procesos CIP. No obstante, en ciertos momentos la generación supera la capacidad de tratamiento, produciendo acumulación temporal. Este hallazgo pone de relieve la importancia de contar con alarmas digitales que anticipen riesgos de sobrecarga y eviten comprometer la eficiencia del tratamiento biológico. Por otra parte, el pH registrado en el tanque 1 se presenta como variable crítica. La necesidad frecuente de correcciones para mantener valores cercanos a la neutralidad confirma la relevancia del mecanismo de ajuste automático implementado a través del tanque 3. Este sistema constituye un aporte significativo de la digitalización, al permitir una intervención rápida y precisa que sostiene la estabilidad química indispensable para el uso eficiente de coagulantes y floculantes. De esta manera, el análisis de los resultados de efluentes revela un sistema con alta variabilidad en volúmenes diarios, pero con capacidad de amortiguación y control que, gracias a la digitalización, mejora la trazabilidad operativa y fortalece el cumplimiento normativo.

El análisis de residuos muestra que la corriente predominante corresponde a las tierras de blanqueo agotadas (NP 10 – Tierra mineral), con una participación cercana al ochenta por ciento del total. Este dato confirma que la gestión ambiental de la planta se encuentra fuertemente condicionada por este subproducto, lo que refuerza la importancia de explorar alternativas de valorización que permitan reducir tanto su volumen como los costos asociados a la disposición final. La evolución mensual de los volquetes de residuos no peligrosos refleja una tendencia estable, aunque con oscilaciones moderadas que se vinculan a variaciones productivas. Se observa que la estabilidad en la recolección y disposición externa se mantiene, pero la planificación podría optimizarse ajustando los retiros al ritmo real de la producción, disminuyendo costos logísticos y riesgos de acumulación en planta.

En cuanto a los residuos peligrosos, si bien se generan en menor cantidad, tienen una mayor relevancia normativa y ambiental. La clasificación detallada de estas corrientes según la normativa provincial evidencia un esfuerzo en registro y trazabilidad, mientras que la digitalización permite identificar picos asociados a mantenimientos o intervenciones puntuales. Estos datos constituyen un insumo valioso para anticipar la gestión preventiva y garantizar la correcta disposición de cada flujo.

En particular, los picos de generación de tierras de blanqueo —como los 214 mil kilogramos en julio de 2024— reflejan la influencia de la magnitud de los lotes procesados y de la calidad de la materia prima. La posibilidad de correlacionar digitalmente estos eventos con parámetros productivos ofrece a la empresa una herramienta estratégica para planificar la gestión de residuos de manera más eficiente.

La consideración conjunta de los tres ejes ambientales permite advertir que el desempeño de la planta está interrelacionado: el consumo de agua condiciona la generación de efluentes, mientras que la intensidad de la producción incide directamente en la generación de residuos. En este sentido, la digitalización constituye un aporte decisivo para construir una gestión ambiental integral, capaz de

pasar de un control reactivo a un modelo preventivo y predictivo basado en datos objetivos, trazables y disponibles en tiempo real.

## 4. CONCLUSIONES.

El trabajo desarrollado demuestra que la digitalización de la gestión ambiental en la planta aceitera constituye un avance significativo en términos de eficiencia operativa, trazabilidad y sostenibilidad. La incorporación de sensores IoT, plataformas de visualización en la nube y tableros de control ha permitido transformar el modo en que se monitorean y gestionan los principales flujos ambientales: agua, efluentes y residuos. Entre los principales hallazgos se destacan:

- La estabilidad del consumo de agua y la posibilidad de detectar picos inusuales, lo que habilita acciones correctivas inmediatas y planificación de mantenimientos.
- La variabilidad en la generación de efluentes y la capacidad del sistema de ecualización de amortiguar estas fluctuaciones, optimizada por mecanismos digitales de control de pH y caudal.
- La preponderancia de las tierras de blanqueo en la generación de residuos, cuya gestión requiere estrategias específicas de valorización y optimización logística.

En conjunto, los resultados evidencian que la digitalización no solo facilita el cumplimiento normativo, sino que también habilita una visión integral de la gestión ambiental, articulando información en tiempo real con series históricas para la toma de decisiones estratégicas. Este enfoque convierte a la empresa en un ejemplo de aplicación de los principios de la Industria 4.0 al ámbito ambiental, reforzando su compromiso con la sostenibilidad y su capacidad de adaptación a escenarios de mayor exigencia regulatoria y productiva. En conclusión, la implementación del sistema digital constituye un hito en la transición hacia un modelo de gestión ambiental más robusto, objetivo y predictivo, alineado con los desafíos contemporáneos de la industria agroalimentaria y con la necesidad de garantizar la sostenibilidad en el uso de los recursos naturales.

## 5. REFERENCIAS


- Amirova, E., Garbuzova, T., & Gazieva, L. (2024). Environmental management in the era of digitalization: Opportunities and challenges for green technologies. BIO Web of Conferences, 140, 04009. https://doi.org/10.1051/bioconf/202414004009
- Luna-López, M., Hernández-Lozano, M., Aldana-Franco, R., Álvarez-Sánchez, E., Leyva-Retureta, J. G., Ricaño-Herrera, F., & Aldana-Franco, F. (2021). Sistema inteligente de monitoreo para condiciones ambientales en Industria 4.0. Científica, 25(2), 1–10. https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v25n2a07
- Melo, P. F. S., Godoy, E. P., Ferrari, P., & Sisinni, E. (2021). Open source control device for Industry 4.0 based on RAMI 4.0. Electronics, 10(7), 869. https://doi.org/10.3390/electronics10070869
- Riedmann, S., Binder, C., & Neureiter, C. (2024). Ensuring the application of Industry 4.0 design principles by using reference architectures. Sensors & Transducers, 265(2), 97–105.
- Wright, C. Y., & Wernecke, B. (2020). Using Microsoft Power BI to visualise Rustenburg Local Municipality's air quality data. Clean Air Journal, 30(1). https://doi.org/10.17159/caj/2020/30/1.7512



### Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al Gobierno de la Provincia de Santa Fe, a través del Ministerio de Producción Ciencia y Tecnología, Agencia Santafecina de Ciencia, tecnología e innovación quien cofinancia el desarrollo del proyecto "PEICID-2023-273 Desarrollo de una herramienta para la toma de decisiones en la gestión eficiente del agua, energía, efluentes y ruido ambiental en pymes aceiteras bajo el enfoque de la industria 4.0".

# SINERGIA CON LA INTEGRACIÓN DE LA METODOLOGÍA TRIZ EN EL PENSAMIENTO DE DISEÑO DT (DESIGN THINKING) Y LENGUAJE DEL CUERPO

Nishiyama, Juan Carlos[1]; Marino, Ricardo [1]; Arbore Luciano Nicolás[1]; Omahen Natacha [1]; Requena, Carlos E. [1,2]

*[1]Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional General Pacheco (UTN-FRGP)- Departamento de Ingeniería Mecánica, H. Irigoyen 288, Gral . Pacheco, B1617, Partido de Tigre, Prov. de Buenos Aires, Argentina, Tel. +54-11-6017-5991, jcnishiyama@yahoo.com.ar*

*[2]UCA-Pontificia Universidad Católica Argentina, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias. Alicia Moreau de Justo 1500.C1107AAZ, Buenos Aires, Argentina. carloseduardorequena@yahoo.com.ar*

**RESUMEN**

Un pre - proyecto en producto, proceso o servicio consiste en la construcción de prototipos rápido de bajo costo y validarlos para ver las repercusiones que se obtienen del mismo. Incluye desde la obtención de los requerimientos y necesidad de los usuarios, definición del problema, ideación, prototipado y hasta la validación del prototipo. Estas fases son habituales a todo ingeniero (diseñador) que aplique Design Thinking (DT), para empatizar con los clientes observando, entrevistando y aprendiendo como sienten, piensan, dicen y hacen. Por esto, es fundamental evaluar el lenguaje corporal (kinésica) mediante el uso de un mapa de empatía, para comprender mejor a los usuarios, visualizando sus pensamientos, sentimientos, necesidades, deseos y comportamientos cumpliendo con la viabilidad (negocio), la factibilidad (técnica) y la deseabilidad (usuarios). A esto, debe incorporarse el concepto de sensibilidades de diseño a la funcionabilidad de cualidades intuitivas, como el deleite, la belleza, el significado personal y la resonancia cultural. Para potenciar esta metodología, añadimos TRIZ (Teoría de Resolución de Problemas Inventivos), que es una metodología estructurada para resolver problemas y generar innovaciones que se basa en el estudio de patrones y principios inventivos deducidos de las patentes a lo largo del mundo y en otros campos. Permite identificar patrones de soluciones en problemas similares para encontrar soluciones más efectivas y creativas. Con esta integración se pretende alcanzar una sinergia al pronóstico de resultados con alto impacto.

**Palabras Claves:** Design Thinking (DT), Mapa de Empatía, TRIZ, lenguaje del cuerpo, sensibilidad de diseño

**ABSTRACT**

A pre-project in product, process, or service development involves the construction of rapid, low-cost prototypes and their validation to assess the obtained results. This includes the entire process, from gathering user requirements and needs to problem definition, ideation, prototyping, and prototype validation. These phases are common for any engineer or designer who applies Design Thinking (DT), a methodology for empathizing with customers by observing, interviewing, and learning how they feel, think, say, and act. For this reason, it is crucial to evaluate body language (kinesics) through the use of an empathy map to better understand users, visualizing their thoughts, feelings, needs, desires, and behaviors while fulfilling business viability, technical feasibility, and user desirability. This approach must also incorporate the concept of design sensibilities to the functionality of intuitive qualities such as delight, beauty, personal meaning, and cultural resonance. To enhance this methodology, we add TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving), a structured framework for solving problems and generating innovations based on the study of patterns and inventive principles deduced from patents worldwide and in other fields. It allows for identifying solution patterns in similar problems to find more effective and creative solutions. This integration aims to achieve a synergy that leads to high-impact results.

**Keywords:** Design Thinking (DT), Empathy Map, TRIZ, Body Language, Design Sensibility

## 1. INTRODUCCIÓN.

En un entorno empresarial y tecnológico cada vez más complejo, la innovación ya no es un proceso lineal o exclusivo de un único departamento. Como argumentó el ganador del Premio Nobel Herbert A. Simon (1996), el diseño es una disciplina fundamental que busca "cambiar situaciones existentes por otras preferidas", dotando a la ingeniería de un contenido teórico propio. En este sentido, la innovación efectiva va más allá de la mera creación de un producto o servicio; implica la concepción de un ecosistema completo que responda genuinamente a las necesidades y deseos de las personas, tal como lo ejemplificó Thomas Edison al no solo inventar la bombilla eléctrica, sino también el sistema que la hacía útil (Brown, 2008; Mootee, 2013).

Para abordar este desafío, diversas metodologías han ganado relevancia. El Pensamiento de Diseño (*Design Thinking*), con su enfoque humanista, se ha consolidado como un marco ágil para la ideación y el desarrollo de prototipos (Brown, 2008, 2009; Vianna et al., 2012). Por otra parte, la Teoría de Resolución de Problemas Inventivos (TRIZ) ofrece una perspectiva estructurada y analítica, basada en el estudio de patentes para generar soluciones innovadoras y superar contradicciones técnicas (Savransky, 2000; Nishiyama & Requena, 2019; Cameron, 2010). Si bien ambas metodologías tienen fortalezas distintivas, el éxito de cualquier proceso de diseño, sin importar el método utilizado, depende de un paso previo y fundamental: la empatía (Gila & Conesa, 2017; IDEO, s.f.; Hasso Plattner Institute of Design at Stanford, s.f.).

La verdadera innovación no reside en la elección de un método específico, sino en la capacidad de comprender de forma profunda y holística a los usuarios. La fase de empatía es el pilar sobre el cual se construyen soluciones viables, factibles y deseables. Un pensador de diseño, como se describe en la literatura, posee la habilidad de ver el mundo desde múltiples perspectivas, observando los detalles minuciosos que otros no perciben (Brown, 2008; Mootee, 2013). En esta fase, herramientas visuales como el mapa de empatía son fundamentales para capturar y organizar los pensamientos, sentimientos y comportamientos de los usuarios (Gila & Conesa, 2017; IDEO, s.f.). Más aún, la evaluación del lenguaje corporal se convierte en una técnica invaluable, ya que permite a los diseñadores ir más allá de las respuestas verbales y obtener una comprensión más auténtica de las necesidades y emociones subyacentes (Pease & Pease, 2001; Robbins, 1993; Ekman, 2003).

Este trabajo propone una sinergia entre *Design Thinking* y TRIZ. Argumentamos que la agilidad y el enfoque empático de la primera, enriquecida por la atención a la comunicación no verbal, se complementa con la rigurosidad y el marco inventivo de la segunda (Lee, 2019; Guarneros García et al., 2023). La combinación de estas metodologías, partiendo siempre de una profunda comprensión del usuario, no solo busca la funcionalidad, sino también la incorporación de sensibilidades de diseño que añadan deleite, belleza y significado personal a las soluciones (Suri & Hendrix, s.f.). El objetivo final es demostrar que esta integración holística puede generar un proceso de innovación superior y pronosticar resultados de alto impacto al poner la empatía como el punto de partida esencial de todo diseño (Brown, 2008; Nishiyama & Requena, 2019; Gila & Conesa, 2017).

## 2. EL PAPEL CENTRAL DE LA EMPATIA EN EL PROCESO DE DISEÑO.

La empatía asegura que la solución resuelva el problema correcto. La investigación y el desarrollo a menudo se centran en resolver problemas técnicos sin antes comprender si esos problemas realmente existen para el usuario final. La empatía es el primer paso para identificar las necesidades, frustraciones y deseos subyacentes de las personas (Brown, 2008). Sin una comprensión profunda de estas realidades, se corre el riesgo de diseñar un producto o servicio que es técnicamente brillante, pero que nadie necesita. Al empatizar, te aseguras de estar resolviendo el problema correcto, no solo el más obvio o el más fácil.

La empatía genera valor y deseabilidad. Un producto exitoso no solo debe ser funcional y técnicamente factible; también debe ser deseable. La deseabilidad se refiere a cómo la gente se siente con respecto a un producto: si les gusta, si les resulta fácil de usar, y si les genera un valor emocional o personal (Vianna et al., 2012). La empatía es la herramienta que permite a los diseñadores ir más allá de la funcionalidad y crear soluciones que conectan a nivel humano. Cuando una persona siente que un producto fue diseñado pensando en sus necesidades y sentimientos, el valor percibido se dispara.

La empatía impulsa la innovación radical. El pensamiento empático conduce a la innovación radical porque permite descubrir necesidades no satisfechas, deseos latentes y comportamientos no evidentes. Observar a los usuarios en su entorno natural y escuchar sus historias revela problemas que ellos mismos no saben cómo articular (IDEO, n.d.). A diferencia de las encuestas tradicionales, que

solo validan ideas preexistentes, la empatía permite a los diseñadores desenterrar conocimientos profundos que pueden dar lugar a ideas completamente nuevas y disruptivas (Mootee, 2013).

**2.1 La diferencia entre la empatía y la simpatía.**

Aunque a menudo se usan indistintamente en el lenguaje cotidiano, la empatía y la simpatía representan dos enfoques fundamentalmente distintos para la conexión humana, con implicaciones directas en el proceso de diseño y la innovación. Comprender esta diferencia es importante para asegurar que la etapa de empatía de cualquier metodología de diseño sea genuina y efectiva.

La simpatía es la capacidad de sentir pena por el otro. Es una conexión superficial que observa el sufrimiento de una persona desde la distancia y responde con un sentimiento de compasión (Raven Digitalis, 2021). Al simpatizar, decimos "Siento que estés pasando por eso", reconociendo el dolor del otro, pero manteniéndonos fuera de él.

Por el contrario, la empatía es la capacidad de ponerse en el lugar del otro. Es una conexión profunda que no solo reconoce el sentimiento, sino que busca sentir con la otra persona. La empatía nos impulsa a decir "Sé lo que sientes", porque hemos logrado comprender su perspectiva y emociones, aunque no hayamos vivido la misma experiencia. La empatía elimina la distancia y permite al diseñador experimentar el problema desde la perspectiva del usuario (Robbins, 1993).

En el contexto del diseño, esta distinción es vital. La simpatía podría llevarnos a crear una solución basada en suposiciones de lo que la gente "necesita", mientras que la empatía nos exige una observación, escucha e inmersión activa. El enfoque en la empatía, y no en la simpatía, es lo que permite a los diseñadores descubrir las verdaderas necesidades no articuladas y crear productos o servicios que no solo resuelven un problema, sino que también generan una conexión emocional y un valor genuino para el usuario.

Tabla 1 Diferencia entre Empatía y Simpatía

| **EMPATIA** | **SIMPATIA** |
|---|---|
| **Tiende a la conexión** | **Tiende a la desconexión** |
| **Escuchar para aprender** | **Escuchar para responder** |
| **Se centra en la emoción** | **Busca la aprobación** |
| **Requiere aprendizaje** | **espontaneo** |
| **Respuesta no verbal** | **Respuesta verbal** |
| **No juzga** | **juzga** |
| **No es mutua** | **Es mutua** |
| **Plano emocional** | **Plano intelectual** |
| **Escucha los sentimientos** | **Escuchas las palabras** |
| **Se centra en lo personal** | **Se centra en la solución** |

**2.2 Modalidad de percepción de la comunicación.**

En los estudios sobre comunicación interpersonal y cognición, se reconoce que las personas tienden a procesar y dar sentido a la realidad a través de diferentes modalidades de percepción. Estas modalidades, vinculadas con los sentidos, influyen en cómo los individuos reciben, interpretan y transmiten información (Robbins, 1993). Identificar la modalidad predominante de un interlocutor puede favorecer la creación de rapport y mejorar la efectividad comunicativa, mientras que ignorarla puede generar malentendidos o incluso rechazo (Rojas Soriano, 2023).

Las tres modalidades principales son:

1. Visual
   Las personas con predominancia visual procesan la información principalmente a través de imágenes. Prefieren representaciones gráficas, esquemas o notas, y suelen expresar sus pensamientos con frases como: *“veo lo que dices”* o *“mira cómo te explico”*. Este tipo de

personas tienden a imaginar conceptos de manera visual; por ejemplo, al escuchar la palabra *"verde"* evocan mentalmente la imagen de un césped o de un objeto de ese color. En el plano comunicativo, suelen preferir las interacciones cara a cara, donde los elementos visuales complementan el mensaje verbal.

2. Auditiva
   Quienes se orientan por la modalidad auditiva se enfocan principalmente en los sonidos. En su lenguaje cotidiano aparecen expresiones como: *"he oído lo que dices"* o *"¿qué tal suena esta idea?"*. Están más atentos a los tonos, ritmos y matices de la voz, además de a su propio "diálogo interno". Esta sensibilidad auditiva implica que la manera de hablarles —el volumen, la entonación y la claridad— es tan importante como el contenido del mensaje.

3. Kinestésica
   En este caso, las personas priorizan las sensaciones corporales y las emociones como filtro principal para comprender la realidad. Suelen usar expresiones como: *"no se siente bien"* o *"me hizo sentir…"*. Para establecer una comunicación efectiva con ellas, resulta fundamental atender al componente afectivo y emocional del mensaje, más allá de los hechos objetivos.

Tabla 2 Modalidad de percepción en la comunicación

| **Modalidades de percepción de la comunicación** | | | |
|---|---|---|---|
| **GENÉRICA** | **VISUAL** | **AUDITIVA** | **Cinestésica** |
| **Le comprendo** | **Ya veo lo que quiere decir** | **Le escucho, prosiga** | **Sintonizo con lo que usted dice** |
| **Quiero comunicarle una cosa a esto** | **Quiero que eche una ojeada a esto** | **Quiero decir bien alto y claro** | **Quiero que se haga usted cargo de esto** |
| **¿Comprende lo que he querido transmitir?** | **¿Tiene usted una imagen bien clara?** | **¿Le suena lo que se ha dicho aquí?** | **¿Ha entendido bien el asunto?** |
| **Sé que es cierto** | **Lo sé sin sombra de duda -** | **Esa información es correcta palabra por palabra** | **Es una información sólida** |
| **No estoy seguro De esto** | **No lo veo claro** | **No me suena** | **esto Me parece que no le sigo** |
| **No me gusta lo que está haciendo** | **No lo veo en este papel** | **Esto me suena mal** | **Esto me choca** |
| **La vida es buena** | **La vida es bella** | **La vida es armonía** | **La vida es calor y tranquilidad** |

### 2.3 Lenguaje del cuerpo.

El lenguaje del cuerpo constituye una de las formas más significativas de comunicación no verbal (Pease & Pease, 2001). A través de gestos, posturas, miradas, expresiones faciales y el uso del espacio personal, las personas transmiten información sobre sus emociones, actitudes e intenciones sin necesidad de recurrir al lenguaje verbal. Se trata de un componente esencial en la interacción humana, ya que permite revelar estados internos de manera inmediata y muchas veces más honesta que las palabras.

En este sentido, el lenguaje corporal puede reforzar, matizar o contradecir lo expresado verbalmente. Comprenderlo no solo favorece la interpretación adecuada de las intenciones ajenas, sino que también mejora la capacidad propia de comunicación y la construcción de vínculos de confianza (*El lenguaje corporal*, 1996).

Lenguaje corporal consciente e inconsciente

- Consciente: corresponde a los gestos y posturas que una persona utiliza de manera intencional para transmitir un mensaje específico. Es frecuente en contextos formales, como entrevistas laborales, discursos o negociaciones, donde la postura erguida, el contacto visua l sostenido o los gestos controlados buscan proyectar credibilidad y seguridad.
- Inconsciente: se manifiesta de manera espontánea y refleja emociones genuinas. Expresiones faciales involuntarias, movimientos nerviosos o cambios en la postura pueden delatar sentimientos de incomodidad, ansiedad o alegría, incluso cuando el mensaje verbal intenta

ocultarlos. Este tipo de comunicación resulta difícil de manipular y suele ser interpretado como más auténtico.

Manifestaciones principales del lenguaje corporal

Diversas investigaciones han clasificado las expresiones corporales en categorías que aportan información relevante sobre la percepción y las emociones humanas:

- Expresiones faciales: revelan estados emocionales universales como alegría, tristeza, ira, sorpresa, miedo o asco (Ekman, 2003).
- Gestos: movimientos de manos, brazos o cabeza que complementan o enfatizan el discurso. Pueden transmitir aprobación, rechazo, duda o nerviosismo.
- Posturas corporales: la manera de sentarse o pararse refleja actitudes como seguridad (postura erguida) o desinterés (postura encorvada).
- Movimientos oculares: el contacto visual puede expresar confianza e interés, mientras que evitarlo puede reflejar inseguridad o incomodidad, aunque su interpretación varía según el contexto cultural.
- Proximidad: la distancia interpersonal regula la intimidad y la comodidad en la interacción; invadir el espacio personal puede percibirse como agresivo.
- Tocamientos: rascarse, frotarse las manos o tocarse el cabello suelen estar asociados a nerviosismo, ansiedad o coqueteo, dependiendo del contexto.
- Orientación corporal: la dirección hacia la que se orienta el cuerpo o los pies indica interés o deseo de finalizar la interacción.
- Expresiones paralingüísticas: aspectos de la voz, como el tono, la velocidad o las pausas, que complementan el lenguaje corporal al transmitir emociones y matices.

Investigación pionera por Paul Ekman (2003). ha encontrado que podemos mejorar nuestra capacidad para identificar las emociones de otras personas mediante el estudio sistemático expresiones faciales

Existen siete emociones básicas

Tabla 5 Expresiones faciales

| | |
|---|---|
| • **Alegría** | • **Miedo** |
| • **Asco** | • **Sorpresa** |
| • **Tristeza** | • **Enojo** |
| • **Desprecio** | |

Dentro de las expresiones faciales, cobra especial importancia el análisis de la sonrisa. Es uno de los gestos que podemos expresar mediante la boca, la cual proporciona información acerca del estado anímico de una persona. La empatía se da cuando puedes sentir lo que siente otra persona. La empatía es la base de un proceso de diseño centrado en el ser humano; al comprender profundamente a las personas, podemos diseñar mejor para ellas.

### 2.4 Mapa de empatía.

El Mapa de Empatía es una herramienta utilizada dentro del marco del Design Thinking para profundizar en la comprensión de los usuarios y generar un diseño centrado en la persona (Hasso Plattner Institute of Design at Stanford, n.d.). Según la guía *Bootcamp Bootleg* (traducida al español por LANTERN de la Universidad de Stanford), un buen diseño debe basarse en un conocimiento profundo del usuario, más allá de los datos objetivos, incorporando percepciones, emociones y motivaciones que guían sus decisiones (IDEO, n.d.).

El mapa organiza la información en cuatro cuadrantes que permiten sintetizar las observaciones obtenidas en el trabajo de campo (entrevistas, registros audiovisuales, notas de observación, entre otros), a fin de descubrir *insights* relevantes que orienten la generación de soluciones:

- Decir (Say): expresiones verbales, citas o frases significativas pronunciadas por el usuario.
- Hacer (Do): acciones y comportamientos observables que evidencian la manera en que interactúa con su entorno.
- Pensar (Think): ideas, creencias o motivaciones que pueden inferirse a partir de sus comentarios y actitudes.
- Sentir (Feel): emociones, frustraciones, deseos o expectativas que emergen en la experiencia del usuario.

El uso del mapa permite a los equipos de diseño sintetizar información cualitativa compleja en un formato visual simple, facilitando la identificación de patrones y necesidades latentes. De este modo, se convierte en un puente entre la observación empírica y la generación creativa de alternativas (Gila & Conesa, 2017).

Asimismo, al integrarse con metodologías de resolución de problemas como TRIZ/TRIZCIS, el mapa de empatía cumple un rol complementario: mientras que TRIZ aporta un enfoque estructurado y sistemático basado en la resolución de contradicciones técnicas (Savransky, 2000; García-Manilla, 2023), el mapa de empatía asegura que las soluciones no pierdan de vista la dimensión humana y respondan efectivamente a las necesidades de los usuarios.

El proceso de empatía en el diseño requiere ir más allá de lo que los usuarios dicen explícitamente. Las creencias, pensamientos y emociones, que no son directamente observables, deben inferirse prestando atención a pistas sutiles como el lenguaje corporal, el tono de voz y la elección de palabras. Esta observación detallada es fundamental para un análisis riguroso de la experiencia del usuario (Pease & Pease, 2001; Ekman, 2003; El lenguaje corporal..., 1996).

A partir de esta observación, el diseñador debe identificar necesidades e insights. Las necesidades son los requerimientos humanos (emocionales y físicos), expresados como verbos para denotar acciones o deseos, y no como sustantivos que sugieran soluciones. Los *insights*, por otro lado, son descubrimientos inesperados o ideas clave que surgen de las contradicciones entre lo que el usuario dice y lo que hace (Rojas Soriano, 2023). Estas tensiones y contradicciones son un motor esencial para la creatividad y para encontrar oportunidades de diseño.

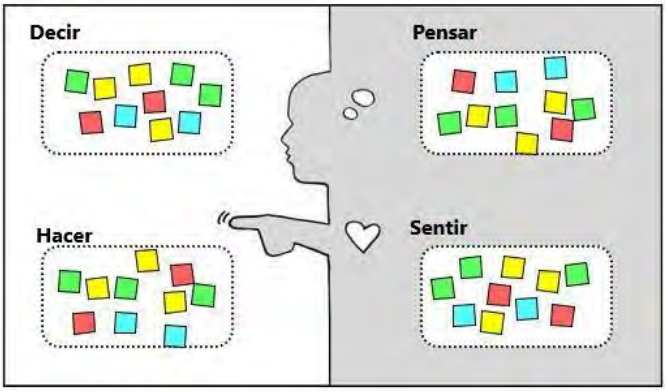



Figura 3 Mapa de empatía en cuatros cuadrantes

Adicionalmente, un diseño exitoso no se limita a resolver problemas funcionales. Como señalan Jane Fulton Suri y Michael Hendrix, es fundamental desarrollar las sensibilidades de diseño (Suri & Hendrix, n.d.). Estas consisten en la capacidad de aprovechar cualidades intuitivas como el deleite, la belleza, el significado personal y la resonancia cultural. Invertir en estas sensibilidades permite que los diseños conecten emocionalmente con las personas, lo que se traduce en una mayor fidelidad del cliente y evita el riesgo de crear soluciones que, siendo funcionales, carecen de atractivo y deseabilidad. El desarrollo de estas sensibilidades, al igual que los métodos de diseño, es una habilidad que se puede aprender y que es de gran valor para la toma de decisiones estratégicas.

### 2.5 Sensibilidades de diseño.

Las sensibilidades de diseño se refieren a la capacidad de los diseñadores e innovadores para aprovechar cualidades intuitivas y subjetivas que enriquecen un proyecto. Estas sensibilidades incluyen

el deleite, la belleza, el significado personal y la resonancia cultural, aspectos que no siempre son medibles de forma objetiva, pero que influyen de manera decisiva en la experiencia del usuario (Suri & Hendrix, n.d.).

En los procesos de innovación, las sensibilidades de diseño cumplen un rol esencial, ya que permiten tomar decisiones que trascienden lo puramente técnico o funcional. Desde la formulación de la gran idea estratégica de un proyecto hasta los detalles más sutiles en la implementación, estas decisiones subjetivas determinan la identidad, el atractivo y la aceptación de una propuesta.

El Pensamiento de Diseño (Design Thinking) plantea la necesidad de encontrar un equilibrio entre métodos estructurados y sensibilidades creativas. Mientras que los métodos aportan rigor, orden y repetibilidad en los procesos, las sensibilidades aseguran que el resultado final conecte emocional y culturalmente con las personas. Este balance posibilita que la innovación no solo resuelva problemas, sino que también genere experiencias significativas y memorables para los usuarios.

Profundamente conscientes de lo que les rodea, las observaciones de los diseñadores conforman e inspiran su trabajo, con frecuencia de un modo delicado. La mayor parte de los profesionales reconoce fácilmente los beneficios prácticos de un producto o servicio, pero por lo general pasan por alto las cualidades menos obvias de una experiencia de la que obtienen placer, identidad y significado. Sin las sensibilidades de diseño, el pensamiento de diseño corre el riesgo de abordar sólo inquietudes funcionales y fracasar en aspectos de deseabilidad (Suri & Hendrix, n.d.).

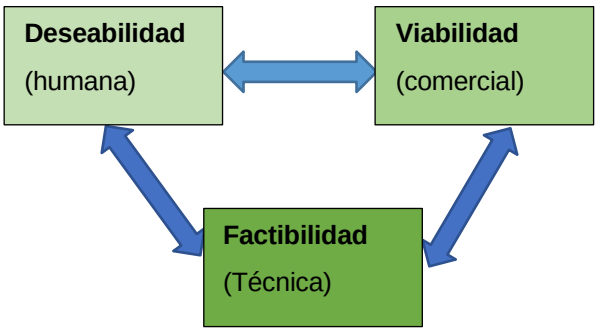
Del mismo modo que los métodos de diseño, las sensibilidades de diseño se pueden aprender, aunque es necesario estímulo, respeto y disciplina para desarrollarlas totalmente.




Figura 4. Pensamiento de diseño: lograr un equilibrio entre métodos y Sensibilidades de diseño:

**2.6 Restricciones del pre-proyecto.**

Las restricciones se pueden visualizar mejor en términos de tres criterios que se solapan para lograr ideas de éxito: factibilidad, lo que es posible funcionalmente en el futuro próximo; viabilidad, lo que es probable que pase a formar parte de un modelo de negocio sostenible y deseabilidad, lo que tiene sentido para las personas (Brown, 2008).




- Deseabilidad Lo que tienen sentido para las personas
- Viabilidad probable como modelo de negocio
- Factibilidad lo que es funcionalmente posible en el futuro próximo

Figura 5. Tres criterios a valorar Deseabilidad-viabilidad -Factibilidad

## 4. METODOS DE DISEÑO.

En la búsqueda de soluciones innovadoras, se han establecido diversas metodologías que guían el proceso de diseño y desarrollo. En este trabajo, nos centramos en dos enfoques que, a pesar de sus diferencias, ofrecen un potencial sinérgico significativo: el Pensamiento de Diseño (Design Thinking) y la Teoría de Resolución de Problemas Inventivos (TRIZ). La integración de TRIZ y Design Thinking establece un marco complementario y robusto para la innovación, fusionando la rigurosidad algorítmica y heurística de TRIZ con el enfoque empático y creativo del Design Thinking (Mootee, 2013). Esta combinación potencia la generación de soluciones tanto desde la perspectiva técnica como desde la experiencia del usuario.

### 4.1 Pensamiento de diseño (Design Thinking en adelante DT).

Es un derivado de los pasos realizados histórica e intuitivamente por los ingenieros (diseñador) cuando realizan desarrollo pre- proyecto de un producto o servicio.

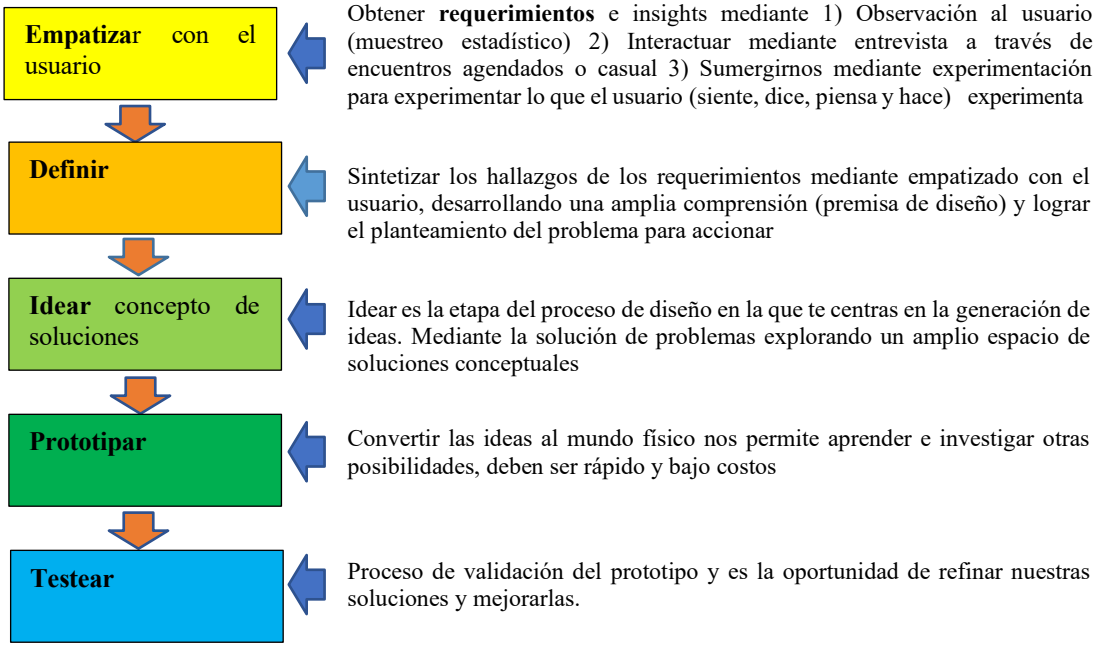



Figura 6. Flujograma DT Pensamiento de diseño

El Design Thinking (DT) es un enfoque centrado en el ser humano, diseñado para la resolución de problemas y la innovación. Se basa en un proceso iterativo que prioriza la empatía profunda con los usuarios para comprender sus necesidades y frustraciones (Brown, 2008). Este método es ampliamente difundido y valorado por su naturaleza colaborativa e interdisciplinaria, que facilita la creación de soluciones que son genuinamente deseables para el cliente (Vianna et al., 2012).

A la hora de desarrollar un producto, el ciclo de Design Thinking podría comenzar con la Empatía, con los desarrolladores poniéndose en el lugar del cliente y buscando comprender en profundidad sus dificultades. Luego se realizaría la Definición, con la discusión, entre los desarrolladores, de los principales desafíos y cuáles serían abordados en el nuevo producto. Luego viene la Ideación, con la búsqueda de soluciones a los retos, seguida del Prototipado y Testeo de las soluciones. El ciclo se repetiría luego hasta lograr una solución suficientemente refinada, momento en el cual el producto se implementaría en producción.

### 4.1 Métodos estructurados de innovación TRIZ y TRIZCIS.

La Teoría de Resolución de Problemas Inventivos (TRIZ), desarrollada por Genrich Altshuller a partir del análisis sistemático de miles de patentes, constituye un enfoque estructurado y riguroso para la resolución de problemas técnicos y de diseño (Savransky, 2000). A diferencia de los métodos de

creatividad espontánea, TRIZ propone un conjunto de principios, herramientas y algoritmos que permiten identificar y superar las contradicciones inherentes a un sistema, llevando a soluciones altamente innovadoras (Cameron, 2010). Su aplicación abarca múltiples dominios de la ingeniería y el desarrollo, proveyendo un rigor analítico que se complementa con la originalidad (Nishiyama & Requena, 2019).

Una de las variantes contemporáneas de esta metodología es TRIZ-CIS (Creativity and Innovation System). Esta variante amplía los fundamentos de TRIZ al incorporar dinámicas propias del pensamiento creativo y del diseño centrado en el usuario (García-Manilla, 2023). TRIZ-CIS busca acercar el marco estructurado de TRIZ a contextos donde la innovación depende no solo de la resolución técnica, sino también de la generación de valor para las personas y las organizaciones. De este modo, se convierte en una herramienta especialmente útil para proyectos interdisciplinarios, al integrar la sistematicidad analítica con la flexibilidad y el enfoque en la innovación aplicada (Nishiyama et al., 2023).

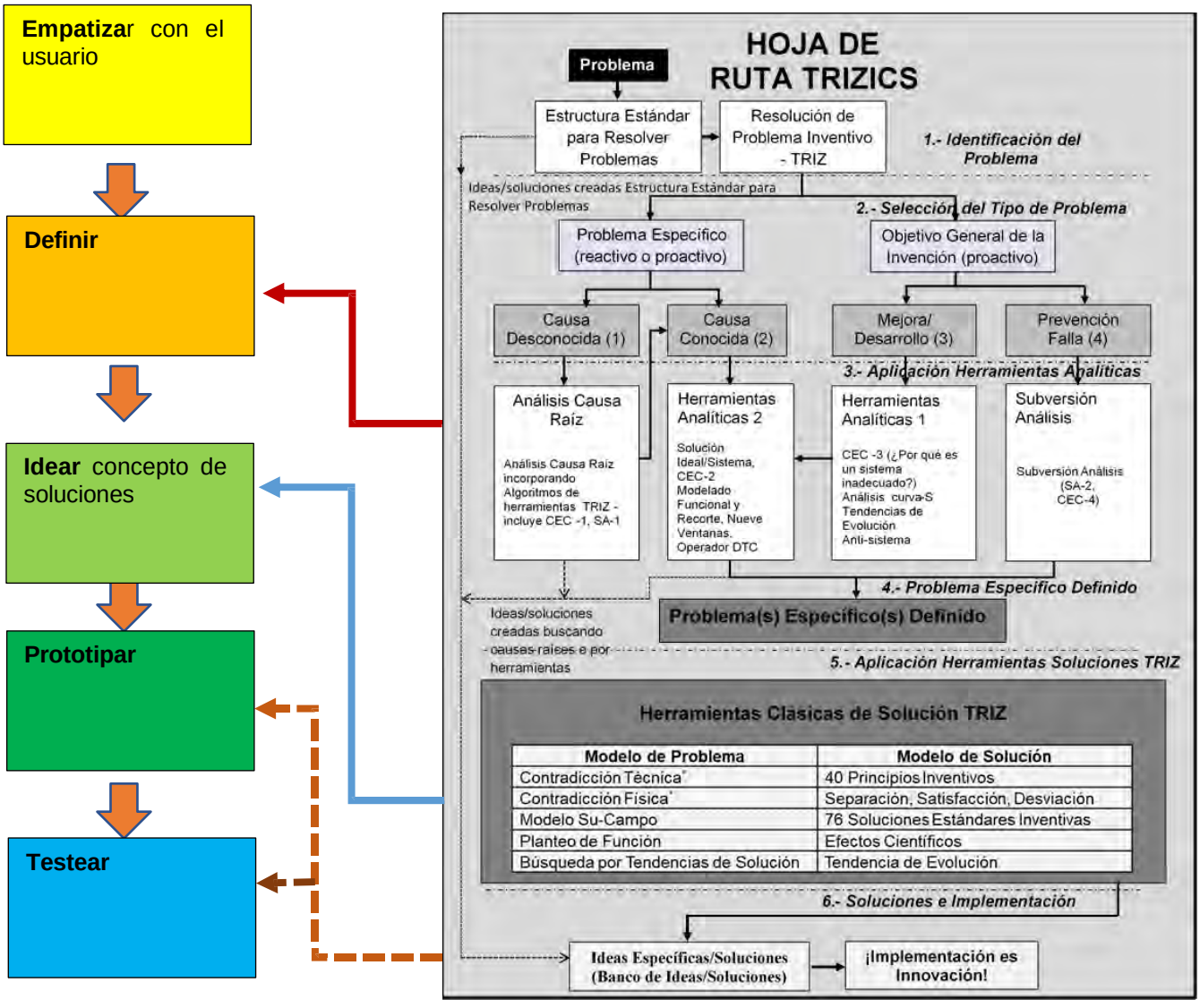



Figura 7. Integración entre pensamiento de diseño y TRIZICS
(Flowchart Desing Thinking y Flowchart TRIZICS)

## 5. INTEGRACION ENTRE METODOS DE DISEÑO.

La integración de TRIZ y Design Thinking establece un marco complementario y robusto para la innovación. Esta combinación fusiona la rigurosidad algorítmica y heurística de TRIZ con el enfoque empático y creativo del Design Thinking, potenciando la generación de soluciones desde la perspectiva técnica y de la experiencia del usuario (Mootee, 2013). Los principales beneficios de esta sinergia son:

- Ampliación de las posibilidades creativas: La unión de ambos métodos permite abordar la innovación de manera integral. Mientras TRIZ aporta un conjunto de principios y herramientas capaces de identificar soluciones a problemas técnicos complejos (Nishiyama & Requena, 2019), Design Thinking enriquece este proceso al centrarse en la comprensión profunda de las necesidades de los usuarios (Brown, 2008). El resultado es la creación de propuestas que son simultáneamente sólidas desde el punto de vista técnico y deseables para el usuario (Vianna et al., 2012).
- Enfoque sistemático para la innovación: TRIZ se caracteriza por su metodología estructurada para formular y resolver problemas, lo que resulta invaluable al enfrentar desafíos técnicos en el desarrollo de productos (Savransky, 2000). Este rigor se complementa con la mirada humana de Design Thinking, que prioriza la experiencia y las emociones de los usuarios, asegurando que el proceso de innovación no solo sea técnicamente eficiente, sino también relevante (Simon, 1996).
- Resolución de contradicciones: La integración de TRIZ facilita la resolución de contradicciones técnicas, una habilidad crucial en el desarrollo de productos. Al aplicar los métodos específicos de TRIZ (como los principios de separación) durante la etapa de desarrollo, se pueden encontrar soluciones equilibradas y sostenibles que mejoran un aspecto del producto sin afectar negativamente a otro (Cameron, 2010).
- Interacción con el cliente y validación temprana: Mientras Design Thinking promueve la creación rápida de prototipos y la validación directa con los usuarios (Hasso Plattner Institute of Design at Stanford, n.d.), TRIZ puede utilizarse para optimizar dichos prototipos, resolviendo los problemas técnicos que surgen en el proceso iterativo. Esta combinación de enfoques permite una validación temprana y un ajuste continuo, lo que reduce el riesgo de desarrollar soluciones que no satisfagan las expectativas del mercado (Lee, 2019; Guarneros García et al., 2023).

En definitiva, aunque TRIZ tiene un carácter más algorítmico y Design Thinking se basa en la empatía y la libre ideación, la combinación de ambos enfoques puede conducir a resultados mucho más innovadores y efectivos al unir lo mejor de ambos mundos: la solución de problemas inventivos y el diseño centrado en el ser humano.

### 5.2 Eficacia de la combinación de métodos.

Los resultados de este estudio demuestran que la integración de TRIZ y Design Thinking no solo valida las ventajas teóricas, sino que también establece un método altamente eficaz para resolver contradicciones y generar soluciones innovadoras de manera sistemática. Esta combinación permite aprovechar la rigurosidad analítica de TRIZ y la agilidad centrada en el ser humano de Design Thinking (García-Manilla, 2023; Lee, 2019).

En la fase de Ideación (DT), se utilizó TRIZ como una fuente de inspiración estructurada. En lugar de limitarse a una lluvia de ideas sin restricciones, se aplicaron principios inventivos, tendencias evolutivas y otras heurísticas de TRIZ para generar soluciones creativas para problemas técnicos específicos. Esto permitió superar bloqueos creativos y canalizar el pensamiento hacia soluciones más efectivas (Nishiyama & Requena, 2019).

Durante el Prototipado y las pruebas (DT), la metodología TRIZ fue crucial para abordar los problemas técnicos que surgieron en el proceso de desarrollo. Mientras el prototipado rápido facilitaba la retroalimentación del usuario, TRIZ proporcionaba las herramientas necesarias para resolver contradicciones técnicas, optimizando así el diseño de manera iterativa (Savransky, 2000; Vianna et al., 2012).

El Análisis de contradicciones (TRIZ) se convirtió en un paso fundamental. Se utilizaron las heurísticas de TRIZ para identificar y resolver las contradicciones inherentes que se presentaban al intentar mejorar un parámetro sin empeorar otro. Esta capacidad para solucionar problemas complejos y aparentemente imposibles es lo que diferencia a esta metodología integrada (Cameron, 2010; Nishiyama et al., 2023).

Finalmente, la Retroalimentación iterativa (TRIZ y DT) a lo largo del ciclo de desarrollo fue un pilar de la efectividad del método. El Design Thinking enfatiza la iteración con los usuarios para validar la deseabilidad (Brown, 2008), mientras que TRIZ proporciona la guía para resolver los problemas técnicos en constante evolución que surgen de esa retroalimentación (Guarneros García et al., 2023).

Promover una Formación y colaboración interdisciplinaria entre los equipos con experiencia en ambas metodologías es clave para una integración efectiva y una innovación sostenida (Mootee, 2013; Suri & Hendrix, n.d.).

### 5.3 Resultados de la Aplicación del Rapport en la Fase de Empatía.

El rapport, entendido como la capacidad de construir confianza y sintonía con el usuario, constituye una herramienta clave dentro de la fase de empatía del *design thinking*. No se trata de un formalismo, sino de un recurso esencial para acceder a una comprensión más profunda de las experiencias de las personas.

Los principales resultados observados en su aplicación fueron:

- Generación de confianza: cuando los usuarios se sienten escuchados y valorados, comparten percepciones y experiencias más auténticas (Brown, 2009).
- Observación en contextos naturales: al crear un ambiente cómodo, el usuario actúa de manera más espontánea, lo que permite captar reacciones y conductas reales, condición fundamental en la investigación de diseño (IDEO, 2015).
- Detección de necesidades latentes: la sintonía lograda facilita identificar señales no verbales (gestos, silencios, posturas) que expresan necesidades o tensiones difíciles de verbalizar (*El lenguaje corporal*, 1996).

En síntesis, el rapport se consolida como la puerta de entrada a la empatía, transformando la interacción con los usuarios en una conversación significativa que habilita la obtención de *insights* valiosos. En este sentido, más que un fin en sí mismo, constituye un medio eficaz para lograr una comunicación profunda entre diseñador y usuario, asegurando que el proceso de innovación se mantenga verdaderamente centrado en las personas (Brown, 2009).

## 6. CONCLUSIONES.

La integración de Design Thinking y TRIZ constituye una estrategia poderosa para la innovación, ya que combina la empatía y el enfoque humanista del primero (Brown, 2008, 2009; Vianna et al., 2012) con la estructura analítica y rigurosa del segundo (Savransky, 2000; Cameron, 2010; Nishiyama & Requena, 2019). Este trabajo muestra que dicha sinergia puede conducir a soluciones técnicamente sólidas y, al mismo tiempo, altamente significativas para los usuarios (Lee, 2019; García-Manilla, 2023).

Dentro de este marco, la técnica de *rapport* se presenta como un recurso valioso, pues permite mejorar la comunicación y empatizar de manera más efectiva con los usuarios, generando así una comprensión más profunda de sus necesidades explícitas y latentes (Rojas Soriano, 2023; Ekman, 2003; Pease & Pease, 2001). No obstante, la validación práctica de esta integración en distintos sectores productivos y contextos culturales sigue siendo un desafío abierto (Nishiyama, Marino, Arbore & Requena, 2023).

En este sentido, futuros estudios podrían explorar la implementación de esta combinación en entornos educativos, industriales o de servicios (Guarneros García et al., 2023), así como desarrollar métricas que midan su impacto en términos de creatividad, eficiencia y satisfacción del usuario. Se espera que esta línea de investigación continúe expandiéndose, ofreciendo nuevas perspectivas para quienes deseen profundizar en la intersección entre metodologías de diseño, innovación y desarrollo tecnológico (Mootee, 2013; Suri & Hendrix, n.d.; Simon, 1996).

## 7. REFERENCIAS:

Brown, T. (2008). Design Thinking. *Harvard Business Review, 86*(6), 84–92.

Brown, T. (2009). *Diseñar el cambio*. Ediciones Urano.

Cameron, G. (2010). *TRIZICS – Teach yourself TRIZ, how to invent, innovate and solve "Impossible" technical problem systematically*. CreateSpace.

Ekman, P. (2003). *Cómo detectar mentiras: Una guía para utilizar en el trabajo, la política y la pareja*. Ediciones Paidós.

García-Manilla, H. D. (2023). Application of Design Thinking and TRIZ Theory to Assist a User in the Formulation of an Innovation Project. In *TRIZ in Latin America Case Studies* (pp. 31–48). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20561-3

Gila, I., & Conesa, P. (2017). *El mapa de empatía y la propuesta de valor*. Universitat Politécnica de Valencia.

Guarneros García, O., Méndez Azua, H., Méndez Ontiveros, M., & Espericueta González, D. E. (2023). Use of TRIZ and Design Thinking in Innovation Subject Projects. *Revista electrónica ANFEI Digital, 10*(15).

Hasso Plattner Institute of Design at Stanford. (n.d.). *EMPATHY FIELDGUIDE*.

IDEO. (n.d.). *Bootcamp - bootleg*. Stanford University. Recuperado de https://dschool-stanford-edu.translate.goog/tools/design-thinking-bootleg

Lee, K. (2019). *Innovative Design Thinking Process with TRIZ*. HAL Id: hal-02279754. https://inria.hal.science/hal-02279754v1

Mootee, I. (2013). *Design Thinking para la innovación estratégica*. Ediciones Urano.

Nishiyama, J. C., & Requena, C. A. (2019). *Los 40 Principios de Inventiva de TRIZ: Metodologías para el Desarrollo de la Creatividad en Ingeniería*. Edutecne.

Nishiyama, J. C., Requena, C. E., Marino, R., & Arbore, L. (2023). *Los 10 principios de inventiva adicionales de TRIZ*. EDUTECNE.

Nishiyama, J. C., Marino, R., Arbore, L. N., & Requena, C. E. (2023). Problems in the Spreading of TRIZ in Argentina. In *TRIZ in Latin America Case Studies* (pp. 71–85). Springer.

Pease, A., & Pease, B. (2001). *El lenguaje del cuerpo*. Amat Editorial.

Robbins, A. (1993). *Poder sin límites*. Grijalbo.

Rojas Soriano, R. (2023). *El rapport en diversos contextos sociales. Su utilización a través de la práctica*. PyV Editores.

Savransky, S. D. (2000). *ENGINEERING OF CREATIVITY (Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving)*. CRC Press.

Simon, H. A. (1996). *The Sciences of the Artificial*. MIT Press.

Suri, J. F., & Hendrix, M. (n.d.). Más allá del Design Thinking desarrollar las sensibilidades de diseño. *Harvard Deusto Business Review*.

Vianna, M., Vianna, Y., Adler, I. K., Lucena, B., & Russo, B. (2012). *Design Thinking: Innovación en negocio*. MJV Press.

*El lenguaje corporal: Proyectar una imagen positiva*. (1996). Paidós Ibérica S.A.

# OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA EN MANUFACTURA ADITIVA: ANÁLISIS DEL DIAGRAMA DE VORONOI EN PIEZAS DE ABS Y PLA

Magalhães, Victória Guilhotti; Oliveira, Mauro Machado de; Pinto, Rodrigo Vidonscky

*Instituto Federal de São Paulo*[1]

guilhotti.m@aluno.ifsp.edu.br[1]

mauro.mo@ifsp.edu.br[1]

rodrigo.vidonscky@ifsp.edu.br[1]

**RESUMEN**

Con el avance de la manufactura aditiva, surgen nuevas técnicas de optimización destinadas a reducir el material y el tiempo de fabricación. En este contexto, se plantea la propuesta de utilizar el diagrama de Voronoi en el modelado 3D, con el fin de reducir el material y preservar las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas. Este estudio describe la optimización por Voronoi, externa e interna, de un cuerpo de prueba establecido por la norma ASTM D638, utilizando tanto ABS como PLA, que son actualmente los polímeros más comunes en la manufactura aditiva. El trabajo se dividió en tres etapas: la primera de revisión bibliográfica; la segunda de modelado 3D; y la última fue el ensayo de tracción. Para la optimización por Voronoi, se utilizaron los programas Poretron y Meshmixer, para las optimizaciones internas y externas, respectivamente. La reducción de material alcanzó hasta un 36 %, específicamente para la optimización interna en ABS. Después del ensayo de tracción, se compararon las cargas límite de la pieza sin optimización, optimizada por Poretron y por Meshmixer. La resistencia a la tracción sufre pérdidas significativas, llegando hasta un 57 %. Por lo tanto, la optimización por Voronoi sigue siendo interesante solo para piezas que no están sometidas a grandes esfuerzos, pero no es aplicable cuando se requiere resistencia a la tracción. Se espera que este estudio sirva como punto de partida para futuros investigadores que busquen crear modelos de optimización por Voronoi que logren conservar las propiedades mecánicas del material.

**Palabras-clave:** Manufactura aditiva, impresión 3D, diagrama de Voronoi, optimización topológica

**ABSTRACT**

With the advancement of additive manufacturing, new optimization techniques aiming material and fabrication time reduction arise. In this context, it is proposed the use of the Voronoi diagram in 3D modeling, seeking material reduction maintaining the mechanic proprieties of finished parts. This study describes the external and internal optimization via Voronoi in a test specimen defined by ASTM D638, utilizing both ABS and PLA, which are currently the most used materials in additive manufacturing. This study was divided in three steps: first of bibliographical research; secondly of 3D modeling; and last was the tensile properties test. For the Voronoi optimization, the softwares Poretron and Meshmixer were employed, for internal and external optimizations respectively. It was registered a material reduction of up to 36%, specifically for the internal optimization in ABS. After the tensile properties test, the maximum loads for non-optimized, Poretron and Meshmixer parts were compared. The yield strength suffered significant losses of up to 57%. Therefore, Voronoi optimization remains interesting only for parts that are not subjected to great efforts, but not applicable when yield strength is a necessity. It is expected that this study serves as a starting point for future researchers looking for the creation of Voronoi optimization that manage to maintain the mechanical properties of the material.

**Keywords:** Additive manufacturing, 3D printing, voronoi diagram, topological otimization

## 1. INTRODUCCION

Definida por la ABNT como cualquier tecnología que crea objetos físicos mediante la adición de material basado en la representación geométrica, la manufactura aditiva ha ganado gran importancia en el sector industrial en la última década. Nacida en el campo del prototipado rápido, su alta versatilidad geométrica y eficiencia de material (Volpato, 2017) han propiciado el desarrollo de la manufactura aditiva en la automoción, la biomedicina, la industria aeroespacial y muchas otras industrias.

Entre las tecnologías de manufactura aditiva, la más conocida actualmente es la impresión 3D. Comprende más de una técnica (Morandini y Del Vecchio, 2020), y la más popular de ellas es la FDM, o modelado por deposición fundida. En esta técnica, la fabricación se realiza mediante la deposición de filamento fundido en capas, siguiendo un modelo 3D. En la mayoría de los casos, el material utilizado en el FDM es un termoplástico, pero también hay filamentos metálicos y compuestos.

Actualmente, existe una tendencia en la industria a buscar cada vez más flexibilidad y rapidez en el desarrollo y la producción de piezas, al tiempo que los sistemas se vuelven más complejos. En combinación con la Industria 4.0, la manufactura aditiva es un modo importante para satisfacer estas necesidades (Silva et al., 2018).

Algunas de las ventajas más importantes de la impresión 3D en la actualidad son (Weller, 2015, APUD Silva et al., 2018):

1. Tecnología con proceso de fabricación universal;
2. La complejidad del diseño no afecta al coste;
3. La personalización y la flexibilidad no afectan al coste;
4. Los productos pueden reducir el trabajo de montaje mediante la integración.

La impresión 3D también es un proceso de fabricación altamente sostenible. Por un lado, al trabajar con adición en lugar de eliminación, proporciona un ahorro significativo de material. Por otro lado, Terra, Frasnelli, Jacques y Teixeira (2024) destacan que los polímeros utilizados en la impresión 3D suelen ser biodegradables, reciclables o reutilizables.

Sin embargo, como cualquier proceso de fabricación, la impresión 3D no está exenta de desventajas. Las piezas más grandes suelen tener un tiempo de impresión muy lento (Ferreira, Kruger y Santos, 2016), y ciertas geometrías requieren la impresión de soportes que se desecharán al final del proceso, generando residuos.

Tanto para combatir las desventajas como para realzar las ventajas, el proceso de optimización de piezas resulta muy interesante para la impresión 3D. Una de estas técnicas es la formación de huecos en la pieza, ya sea en su interior o en su exterior (Lee et al., 2018), lo que reduce la demanda de material y el tiempo de impresión. Este proceso se denomina optimización topológica. Estos huecos no se crean de forma aleatoria: todos ellos se diseñan a partir de algoritmos matemáticos calculados por ordenador. Uno de ellos es el diagrama de Voronoi, que es una estructura que divide el espacio en celdas según un conjunto de puntos.

La técnica de optimización mediante el diagrama de Voronoi ya se estudia en la manufactura aditiva. Choi et al. (2020), en sus estúdios del diagrama de Voronoi para optimización interna mediante celdas ovales, informan de que las piezas optimizadas se comportan de forma satisfactoria cuando se someten a compresión y presentan una baja concentración de tensiones. Lee et al. (2018) también informan de una baja concentración de tensión cuando se aplica el diagrama de Voronoi.

Sin embargo, hay muy pocos estudios sobre el efecto de la optimización por Voronoi en la resistencia a la tracción de las piezas fabricadas mediante fabricación aditiva. Este trabajo busca investigar este aspecto de la optimización, comenzando con un estudio del estado actual de la manufactura aditiva y el uso del diagrama de Voronoi y culminando con la creación de muestras en ABS y PLA para realizar un ensayo de tracción.

## 1.1 Estado actual

### 1.1.1. Manufactura aditiva

El principio básico de la manufactura aditiva es la idea de que un modelo generado por CAD se fabrique sin necesidad de planificar el proceso (Gibson et al., 2021). Para ello, abarca todo el proceso de fabricación que se lleva a cabo mediante la adición sucesiva de capas de material siguiendo la representación geométrica 3D de la pieza deseada (Volpato, 2017). Actualmente, la manufactura aditiva ya trabaja con polímeros, metales, cerámicas y materiales compuestos.

A pesar de la gran diversidad de procesos y materiales, la manufactura aditiva tiene una estructura común en el proceso de fabricación. Gibson (2021) y Volpato (2017) la describen en los siguientes pasos:

1. CAD: modelado 3D por ordenador de la pieza o componente que se va a fabricar;
2. Conversión a STL: el modelo debe convertirse a STL, que es el formato que divide el modelo en las capas que se van a construir;
3. Transferencia a la máquina: el modelo se carga en la máquina que se va a utilizar;
4. Configuración de la máquina: se configuran los parámetros de la máquina, como temperaturas, restricciones del material, etc.;
5. Fabricación de la pieza en el equipo;
6. Retirada de la pieza y posprocesamiento según sea necesario. En algunas tecnologías, puede incluir procesos de mecanizado.

El paso 05, que es la fabricación propiamente dicha, no se realiza necesariamente en una sola etapa. La norma ABNT 52900 (2018) establece que el proceso de múltiples etapas es aquel en el que la primera operación proporciona la geometría básica y las operaciones siguientes consolidan las propiedades finales de la pieza, sin contar la retirada de los soportes. En el proceso de una sola etapa, la geometría básica y las propiedades finales se consiguen simultáneamente.

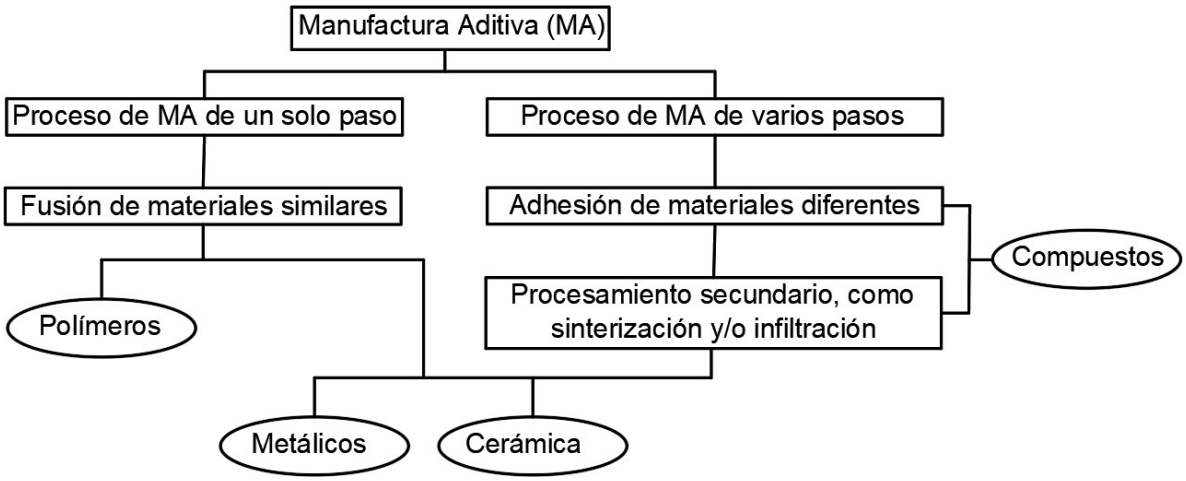



Figura 1 – Clasificación de la MA
Fuente: Adaptado de ABNT (2018)

Para los procesos de una sola etapa en polímeros, la norma ABNT 52900 establece siete categorías, cada una de las cuales abarca diferentes tecnologías. Estas son: fotopolimerización em cubeta, extrusión de material, proyección de material, proyección de aglutinante, fusión de lecho de polvo, adición de láminas y deposición con energía dirigida.

Dentro de la extrusión de materiales, destaca el modelado por deposición fundida (FDM). Este es el proceso popularmente conocido como impresión 3D. Como su nombre indica, se realiza mediante la fusión de un filamento polimérico que se extruye por una boquilla en capas hasta obtener el objeto final (Morandini y Del Vechio, 2020).

El FDM es el proceso más popular por su facilidad de uso y tamaño: las impresoras 3D más básicas suelen tener un espacio de impresión de 200 x 200 x 200 mm (FILAMENT2PRINT, 2018, APUD Jarczewski, 2023). El filamento más utilizado es el termoplástico ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) por su buena calidad y su idoneidad para muchas aplicaciones. El PLA (ácido poliláctico) también es popular por ser barato, imprimirse rápidamente y tener buenas cualidades para la creación rápida de prototipos (Gibson et al., 2021).

### 1.1.2. Diagrama de Voronoi

El diagrama de Voronoi es una técnica utilizada para caracterizar distribuciones espaciales utilizando la relación entre la vecindad de puntos en el espacio (Borovkov y Odell, 2007, APUD Jarczweski, 2023). La definición de un diagrama de Voronoi en el plano viene dada por:

> Dado un conjunto finito de dos o más puntos distintos en el plano euclidiano, se asocian todas las ubicaciones en este espacio con los miembros más cercanos a un punto dado con respecto al espacio euclidiano. El resultado es la teselación del plano en un conjunto de regiones asociadas con los miembros del punto dado. Esta teselación se denomina diagrama de Voronoi plano ordinario, y las regiones constituyentes de polígonos de Voronoi ordinarios. (Okabe *et al.,* 2000, p. 44)

En el espacio tridimensional, el diagrama de Voronoi divide los puntos generadores en poliedros convexos, donde cada punto dentro de estas celdas está más cerca del punto generador de la misma que cualquier otro punto generador en el espacio (Ying *et al.*, 2015).

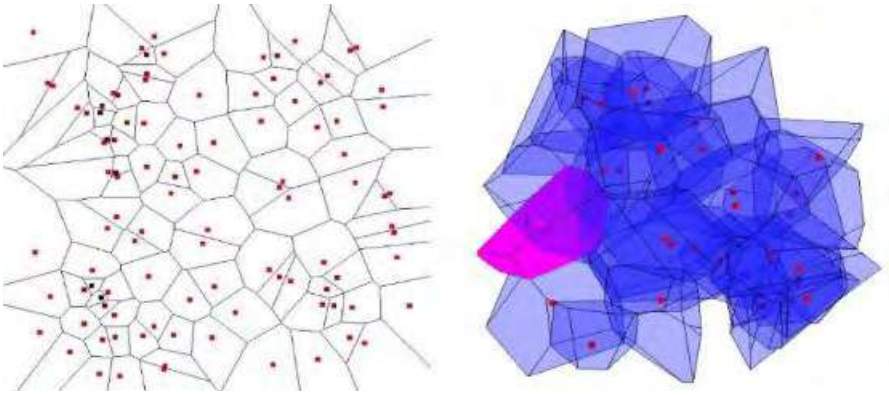


Figura 2 - Diagrama de Voronoi en 2D (izquierda) y 3D (derecha)
Fuente: Ying et al., 2015

Para este tipo de generación, se considera que la expresión P = {p1 , p2 , p3 …}⊂$R$ 3 representa un punto localmente finito donde C(P) = R3 , y C(P) denota la cubierta convexa de la familia P (Ying *et al.*, 2015). A continuación, se genera el diagrama para la ecuación 1:

$$VCelli = \{p \in R3 : |p - pi| \leq |p - pj|\}\ para\ todo\ i \neq j \quad (1)$$

VCelli puede representarse como un poliedro convexo que está confinado y es finito en un espacio 3D. Programas como Meshmixer de Autodesk, que se utilizará en este estudio, se basan en este principio para la formación de sus celdas Voronoi.

De esta manera, el diagrama de Voronoi tridimensional es um modo importante para describir distribuciones espaciales. Otra forma de generar un diagrama de Voronoi en 3D es generarlo en 2D y extruir los polígonos resultantes de forma ortogonal al plano en ambas direcciones (Lee et al., 2018).

Para la generación de celdas en 2D, se puede generar un diagrama ordinario mediante la siguiente fórmula (Okabe et al., 2000):

$$V(pi) = \{x = \|x - x_!\| \leq ?x - x^{"}? = para\ j \neq i, j \in I_{\#}\} \quad (2)$$

En la manufactura aditiva, el diagrama de Voronoi se emplea para la optimización topológica de las piezas fabricadas. Estas estructuras internas pueden modificar las propiedades del material, lo que posiblemente da como resultado piezas más flexibles (Martínez, 2016). Además, la creación de huecos en el interior de la pieza reduce la cantidad de material y el tiempo de impresión.

Una técnica interesante que se puede adoptar al emplear el diagrama de Voronoi para la optimización de piezas es la aproximación de los poliedros de Voronoi en elipses. El problema con las estructuras romboidales es que dan lugar a una concentración de tensiones en los bordes (Lee et al., 2018), lo que aumenta la probabilidad de que aparezcan grietas.

El uso de celdas elípticas evita esto. Para cargas aplicadas iguales, las piezas que utilizan la optimización elíptica muestran una mejor distribución de tensiones en su interior y menores deformaciones que las piezas con optimización romboidal (Choi et al., 2020). El software Poretron, del Voronoi Diagram Research Center, que se utilizará en este estudio, combina esta técnica con la de extrusión de celdas 2D.

Además de los ya mencionados Meshmixer y Poretron, varios programas ya realizan esta optimización. Autodesk tiene la extensión 3D Voronoi Studio para los programas de modelado Inventor y Fusion, y Rhinoceros 3D tiene Grasshopper 3D para esta función.

## 2. OBJETIVO

El artículo aquí presentado tiene como objetivo emplear el diagrama de Voronoi para la optimización topológica de piezas fabricadas mediante impresión 3D, obteniendo una mayor eficiencia energética y de material. El trabajo busca estudiar los impactos de esta técnica en las propiedades mecánicas de las piezas poliméricas fabricadas por FDM, medir la diferencia en el consumo de material y el tiempo de fabricación, y evaluar si la optimización por Voronoi es ventajosa o no para la fabricación aditiva.

Este objetivo se alcanzará mediante el modelado en 3D de una muestra para ensayo de tracción y, a continuación, la creación de un modelo optimizado por Voronoi mediante software especializado para tal fin. Las muestras se fabricarán utilizando impresoras 3D convencionales y, a continuación, se someterán al ensayo de tracción.

## 3. METODOLOGÍA

La metodología adoptada para esta investigación es mixta, basándose en la revisión bibliográfica y la experimentación.

La parte experimental consiste en el diseño, la fabricación y el ensayo de piezas con y sin optimización Voronoi. La fabricación seguirá el proceso tradicional de impresión 3D, desde el modelado de las piezas por CAD utilizando el programa Inventor hasta la impresión propiamente dicha por impresoras 3D convencionales, pero con el paso adicional de optimización utilizando programas especializados para ello, en este caso Poretron y Meshmixer.

Después de la impresión, las piezas se someterán a ensayos de tracción para verificar si su resistencia mecánica se ha conservado con la optimización. Los cuerpos de prueba para el ensayo de tracción siguen la norma ASTM D638.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Muestras

Basándose en la norma ASTM D638, que es la norma norteamericana responsable de los ensayos de tracción en polímeros, se diseñaron tres tipos de probetas. De acuerdo con la norma, el tipo I es para espesores de hasta 7 mm, el tipo II cuando no hay rotura en la sección delgada del tipo I y el tipo III para espesores entre 7 y 14 mm. Se adoptó el tipo I, ya que se adapta mejor al objetivo de este estudio.

El modelo base de la mostra se modeló en 3D utilizando Inventor de Autodesk, siguiendo las cotas indicadas por la norma ASTM D638 y el espesor máximo de 7 mm.

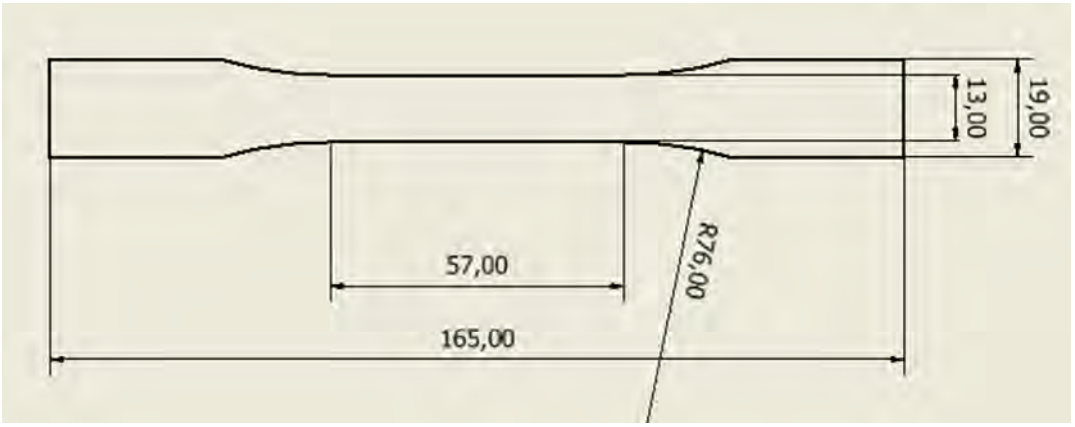



Figura 3 - Cotas utilizadas en mm, según la norma ASTM

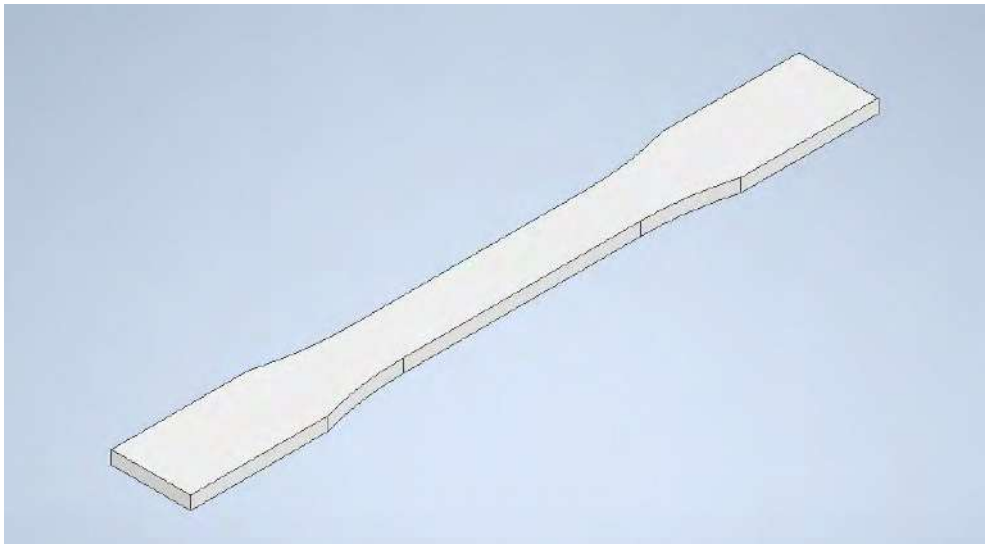


Figura 4 - modelo de la muestra en Inventor

Para la optimización por Voronoi interna, se utilizó el programa Poretron, que está disponible de forma gratuita en el Voronoi Diagram Research Center. En este caso, el programa realiza una optimización interna en todo el cuerpo. La única selección posible es en qué dirección se generarán las elipses.



Figura 5 - Simulación de la optimización por Poretron

Para la optimización mediante Meshmixer, que es una optimización externa, el proceso fue más complicado. En primer lugar, se aísla la parte que se va a optimizar; a continuación, se debe editar la malla triangular mediante la función “Make Solid”.

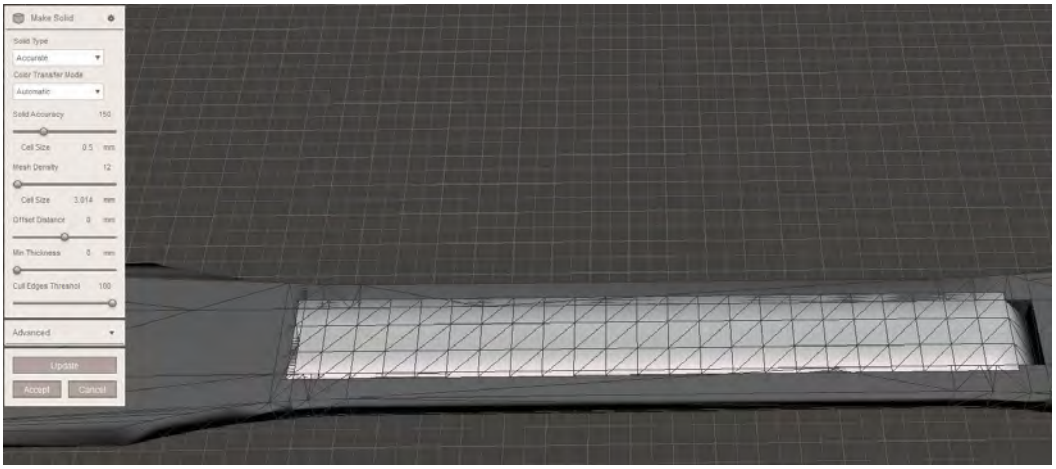



Figura 6 - transformación de la malla mediante Meshmixer

Sin embargo, al editar la malla, se alteran las dimensiones del cuerpo. Una malla más ancha o menos densa “infla’ el cuerpo, por lo que es necesario ajustar los parámetros “mesh density” y “object accuracy” hasta obtener un resultado satisfactorio. Otra opción, si se desea una malla lo más abierta posible, es aceptar la inflamación del cuerpo y eliminar el exceso de material mediante la función “plane cut”.

Para garantizar la integridad estructural, el modelo construido tenía una malla más cerrada y los laterales del cuerpo totalmente densos:

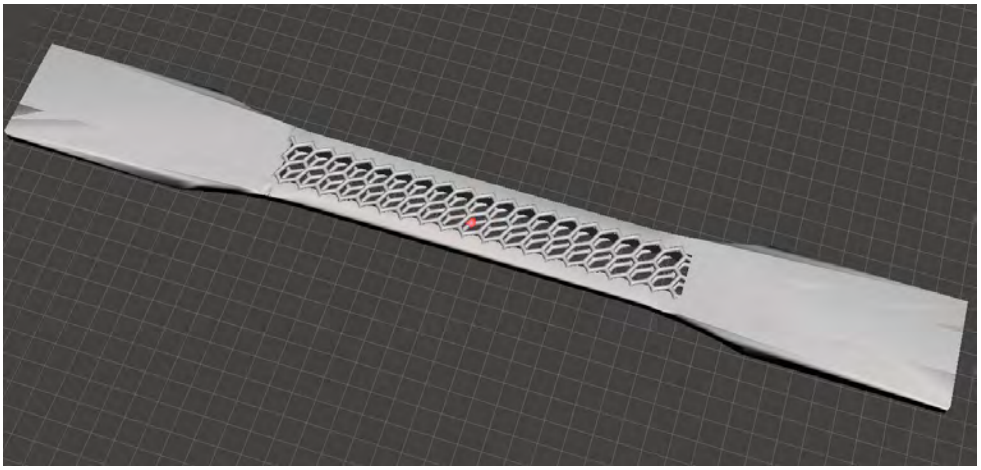


Figura 7 - Modelo en 3D del optimización por Meshmixer

Los resultados preliminares de los tres cuerpos, es decir, los previstos por Ultimaker Cura, el software de corte, son los siguientes:

| PIEZA | PROCESO DE IMPRESIÓN | TIEMPO | CANTIDAD DE MATERIAL |
|---|---|---|---|
| I | Sin Voronoi, densidad 100% | 1 hora y 3 minutos | 10 g |
| II | Con Voronoi por PORETRON, densidade 100% | 1 hora y 1 minuto | 7 g |
| III | Con Voronoi por MESHMIXER | 49 minutos | 8 g |

Tabla 1 - tiempos de impresión y cantidad de material para piezas unitarias en ABS

En todos los casos se utilizó el filamento ABS azul oscuro de GTMax. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes figuras:



Figura 8 – De izquierda a derecha, piezas I, II y III

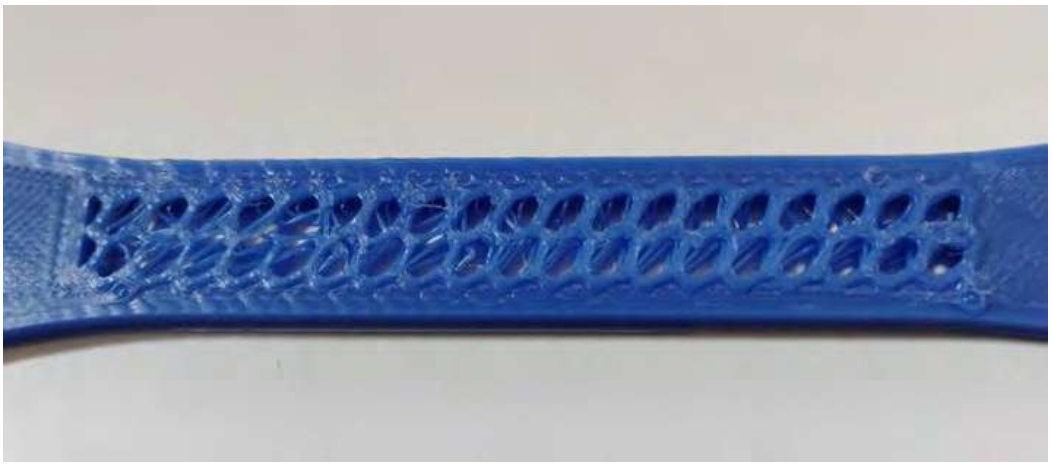


Figura 9 - Primer plano de la zona optimizada de la pieza IV

Es importante señalar que la impresión de piezas unitarias ya demuestra muy bien la reducción de material, pero no la reducción de tiempo: una pieza A puede tardar menos tiempo que la pieza B en una impresión unitaria, pero al imprimir 10 ejemplares de la pieza A, puede llevar mucho más tiempo que la impresión de 10 piezas B.

Este hecho se descubrió cuando se inició la producción de varios cuerpos para el ensayo de tracción de este estudio. De cada tipo de cuerpo se imprimieron 5 piezas a la vez, debido al tamaño de la mesa de la impresora. La diferencia de tiempo y la observación anterior pueden verificarse comparando las tablas 1 y 2:

| PIEZA | PROCESO DE IMPRESIÓN | TIEMPO | CANTIDAD DE MATERIAL |
|---|---|---|---|
| I | Sin Voronoi, densidad 100% | 4 horas y 48 minutos | 50 g |
| II | Con Voronoi por PORETRON, densidad 100% | 7 horas y 2 minutos | 32 g |

| | | | |
|---|---|---|---|
| III | Con Voronoi por MESHMIXER | 4 horas y 16 minutos | 41 g |

Tabla 2 - Tiempos y cantidades de material para tiradas de 5 piezas en ABS

Se observa que, en este segundo caso, la optimización de Poretron aumenta considerablemente el tiempo de impresión, debido al recorrido más complejo de la impresora. Sin embargo, a priori, el resultado sigue siendo satisfactorio por la drástica reducción de material: una reducción de casi el 40 % de filamento es una característica interesante, sobre todo si se tiene en cuenta una futura aplicación industrial.

Por su parte, la pieza III presenta la mejor relación coste-beneficio: a pesar de que la reducción de material es mucho menor, con poco menos del 20 %, el tiempo de impresión se reduce en aproximadamente un 12 %.

A continuación, se repitió el proceso utilizando PLA blanco del fabricante 3Dlab. Sin embargo, en el caso del PLA, la optimización con Meshmixer no tuvo éxito, ya que las redes de Voronoi no mostraron estabilidad. Los resultados se presentan en la figura 13 y en la tabla 3:



Figura 10 - De izquierda a derecha, piezas I y II

| PIEZA | PROCESO DE IMPRESIÓN | TIEMPO | CANTIDAD DE MATERIAL |
|---|---|---|---|
| I | Sin Voronoi, densidad 100% | 5 horas y 27 minutos | 56 g |
| II | Con Voronoi por PORETRON, densidade100% | 7 horas y 2 minutos | 37 g |

Tabla 3 - tiempos y cantidades de material para series de 5 piezas en PLA

Las piezas obtenidas se seleccionaron para realizar ensayos de tracción. El equipo utilizado fue el modelo F305 de Mark-10. Inicialmente, se esperaba que las piezas optimizadas pudieran conservar una buena parte de la resistencia a la tracción, ya que estudios anteriores, como el de Choi (2020), habían obtenido buenos resultados.

Cada modelo de pieza se sometió a cinco ensayos, y la máquina proporcionó la carga límite para cada ensayo. En la tabla tres, el valor “MAYOR LECTURA” se refiere al valor más alto obtenido entre cada una de las cinco rondas, la “CARGA MEDIA” es una media simple de las mismas. El valor “RAZÓN DE CARGA/MASA” es la división de la carga media por la cantidad de material de una sola pieza, cuyos valores se encuentran en las tablas 1 y 2.

| PIEZA (modelo) | MATERIAL | LECTURA MÁXIMA (N) | CARGA MEDIA (N) | RELACIÓN CARGA/MASA |
|---|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| I (sin optimización) | ABS | 1513 | 1491 | 29,82 |
| | PLA | 1594 | 1591 | 28,41 |
| II (Poretron) | ABS | 674 | 668 | 21,06 |
| | PLA | 746 | 686 | 18,54 |
| III (Meshmixer) | ABS | 934 | 853 | 20,81 |

Tabla 4 – Resultados de los ensayos de tracción

Los resultados no cumplieron con las expectativas: se observa una caída considerable en la resistencia a la tracción. La tabla 4 compara la reducción de material con la pérdida de la carga media y la relación carga/masa, en relación con el modelo sin optimización:

| RELACIÓN DE LAS PIEZAS | MATERIAL | REDUCCIÓN DE MATERIAL | PÉRDIDA EN LA CARGA LÍMITE | PÉRDIDA EN LA RELACIÓN C/M |
|---|---|---|---|---|
| I – II | ABS | 36% | 55,20% | 29,38% |
| | PLA | 33,92% | 56,88% | 34,74% |
| I - III | ABS | 18% | 42,79% | 30,21% |

Tabla 5 – Comparación entre la reducción de material y la reducción en la carga media obtenida en el ensayo de tracción

La pérdida en la relación carga/masa es más moderada y se compara con la reducción de material para las optimizaciones de Poretron. Las mayores pérdidas se produjeron en la carga límite media, donde la pérdida de la carga límite llega a ser un 35 % mayor que la reducción de material. Por lo tanto, las piezas optimizadas no son adecuadas para soportar esfuerzos de tracción.

## 5. CONCLUSIÓN

Las optimizaciones de Poretron y Meshmixer presentan ventajas y desventajas: por un lado, una reducción de hasta el 36 % del material representa una gran ventaja para la industria; por otro lado, una pérdida de hasta el 56,88 % de la carga límite registrada indica que el material no es fiable bajo esfuerzos de tracción.

Este resultado no debe analizarse de forma directa, sino que depende de la aplicación de la pieza. El ensayo de resistencia a la tracción puede no representar las condiciones reales de uso, las partes de la pieza que absorben tensiones y vibraciones pueden dar una mayor resistencia a la pieza, o una vida útil mayor que la simple observación y comparación con los ensayos.

Para aplicaciones en las que la pieza no está sometida a cargas significativas, el diagrama de Voronoi puede emplearse para ahorrar material y reducir el peso. Cabe señalar que la optimización mediante Voronoi para la fabricación aditiva es aún un campo muy poco estudiado.

Por último, se espera que este estudio sirva a futuros investigadores como punto de partida para la exploración del diagrama de Voronoi en la fabricación aditiva y, tal vez, para la obtención de modelos que logren conciliar el ahorro de material con la conservación o incluso la mejora de la resistencia mecánica.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638 – 14:** Standard Test Method for Tensile Properties for Plastics. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/ASTM 52900:** Manufatura Aditiva – Princípios Gerais – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BAUMERS, Martin; HOLWEG, Matthias. On the economics of additive manufacturing: Experimental findings. **Journal of Operations Management**, vol 65, n. 8, p, 794-809. Dez. 2019. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joom.1053 Acesso em: 31 de março de 2025.

CHOI, Seunghwan; RYU, Joonghyun; LEE, Mokwon; CHA, Jehyun; KIM, Hyunwoo; SONG, Chanyoung; KIM, Deok-Soo. Support-free hollowing witg spheroids and efficient 3D printing utilizing circular printing motions based on Voronoi diagrams. **Additive Manufacturing**, vol 35, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860420306266 Acesso em: 14 de abril de 2025.

FERREIRA, Géssica da Cruz; KRUGER, Thaisa Regina; SANTOS, Christiane Bischof dos. UTILIZAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D NA MANUFATURA PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS: UM ESTUDO DE CASO EM INDÚSTRIAS AUTOMOBILÍSTICAS. **Memorial TCC Caderno da Graduação – FAE Centro Universitário**, v. 2, n. 1, 2015. Disponível em: https://cadernotcc.fae.edu/cadernotcc/article/view/148 Acesso em: 09 de abril de 2025.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent; KHORASAMI, Mahyar; Additive Manufacturing Technologies. 3ª edição. Suíça, Springer Nature Switzerland AG, 2021.

JARCZEWSKI, Rafael de Oliveira**. Segmentação de objetos para impressão 3D.** TCC em Ciência da Computação, Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2023. Disponível em: https://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/riu/8530/1/Rafael%20de%20Oliveira%20Jarczewski%20-%202023.pdf Acesso em: 12 de abril de 2025.

LEE, M. *et al.*. Support-free hollowing for 3D printing via Voronoi diagram of ellipses. **Computer-Aided Design**, v. 101, p. 23–36, ago. 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448518301362 Acesso em: 31 de março de 2025.

MARTÍNEZ, Jonas; HOMUS, Samuel; SONG, Haichuan; LEFEBVRE, Sylvain. Polyhedral voronoi diagrams for additive manufacturing. **ACM Transactions on Graphics (TOG),** vol. 37, no. 4, p. 1 – 15. Disponível em: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3197517.3201343 Acesso em: 14 de abril de 2025.

MORANDINI, Moisés Miranda. DEL VECHIO, Gustavo Henrique. IMPRESSÃO 3D, TIPOS E POSSIBILIDADES: uma revisão de suas características, processos, usos e tendências. **Interface Tecnológica** -v. 17 n. 2, p 67 – 77. 2020. Disponível em: https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/866/523 Acesso em: 31 de março de 2025.

OKABE, Atsuyuki; BOOTS, Barry; SUGIHARA, Kokichi; CHIU, Sung Nok; KENDALL, D. G. Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams. 2ª Edição. Chichester, Inglaterra, John Wiley & Sons Ltd, 2000.

SILVA, Antonio Luis Araujo de; FEITOSA, Amanda Duarte; ALBUQUERQUE, Ramses Moreira de; XAVIER, Amanda da Silva. MANUFATURA ADITIVA: CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO COM OS PROCESSOS DE PRODUÇÃO EXISTENTES. XVIII **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Maceió, 2018.** Disponível em: https://www.academia.edu/download/100627301/TN_WIC_264_516_35268.pdf Acesso em: 11 de abril de 2025.

TERRA, Tainá Stempkowski; FRASNELLI, Beatriz Martins; JACQUES, Jocelise Jacques de; TEIXEIRA, Fábio Gonçalves. REVISÃO SISTEMÁTICA DE ESTUDOS SOBRE A SUSTENTABILIDADE DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D. ENSUS 2024 – XII Encontro de Sustentabilidade em Projeto, Belo Horizonte, 2024. **Anais [...] Belo Horizonte: UFMG, 2024. P. 666**

– **674.** Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/256902/17.pdf?sequence=1&isAllowed=y Acesso em: 09 de abril de 2025.

VOLPATO, Neri. MANUFATURA ADITIVA: Tecnologia e aplicações da Impressão 3D. São Paulo, Brasil, Editora Edgard Blucher ltda, 2017.

YING, Shen; XU, Guang; LI, Chengpeng; MAO, Zhengyuan. Point Cluster Analysis Using a 3D Voronoi Diagram with Applications in Point Segmentation. **ISPRS Journal of Geo-Information,** vol. 4, p.g 1480-1499. 2015. Disponível em: https://www.mdpi.com/2220-9964/4/3/1480 Acesso em: 14 de abril de 2025.

**AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos al profesor Mauro Machado de Oliveira, quien nos brindó la oportunidad de realizar esta Iniciación Científica y orientó el trabajo, y al profesor Rodrigo Vidonscky Pinto por su colaboración. Del mismo modo, agradecemos a la institución FAPESP por financiar este proyecto. Agradecemos a los ingenieros Flávio Augusto Luiz y Leandro da Silva Santos, de la empresa Nova ND Tecnologia, por proporcionarnos el espacio, el equipo y realizar las pruebas de tracción. Y al profesor Rodrigo Rech, del Instituto Federal de São Paulo, y al estudiante de Ingeniería Mecánica Nathan Polatto, de la misma institución, por sus importantes orientaciones en el proceso de impresión 3D y el funcionamiento de las máquinas. Agradecemos al a profesora Ana Cristina Guilhotti, por su guía durante la traducción de esta obra.

# ESTRATEGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE CALOR RESIDUAL DE UNA CALDERA PIROTUBULAR EN LA INDUSTRIA CHOCOLATERA ECUATORIANA

Rodríguez, Gissel; Jarrín, Diego; Urresta, Esteban

*Instituto de Investigación Geológico y Energético*
*gissel.rodriguez@geoenergia.gob.ec*

**RESUMEN**

En los últimos años, el cacao se ha convertido en el principal producto de crecimiento entre las exportaciones no petroleras del Ecuador. Este desempeño ha permitido al país mantener su liderazgo como primer exportador mundial de cacao, con perspectivas de alcanzar cifras récord en sus niveles de exportación. Este crecimiento ha impulsado a las empresas nacionales productoras de chocolate a optimizar sus procesos bajo principios de eficiencia energética y sostenibilidad, en concordancia con las normativas ambientales vigentes, el programa nacional "Ecuador Carbono Cero" y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente aquellos relacionados con la producción responsable, la acción climática y el uso eficiente de los recursos. En este contexto, el presente estudio propone una estrategia de recuperación de calor residual aplicada a una caldera pirotubular a diésel utilizada en una planta procesadora de cacao en la ciudad de Guayaquil. Se desarrolló un modelo teórico basado en balances energéticos y propiedades considerando la implementación de un economizador de vapor-agua de carcasa y tubos en la línea de salida de los gases de combustión. Los resultados muestran una recuperación energética de 97 305.46 kJ/h, lo que permite incrementar la temperatura del agua de alimentación de 33.65 °C a 58.43 °C y reducir la temperatura de los gases de combustión de 211.73 °C a 150 °C. Esto se traduce en un ahorro anual estimado de 5 544.023 litros de diésel, con un período de retorno de inversión inferior a tres años. Más allá del beneficio económico, los resultados presentan una disminución significativa de gases de efecto invernadero, lo que evidencia la necesidad de un enfoque más sostenible y eficiente en el sector cacaotero.

**Palabras Claves**: Industria del cacao; Recuperación de calor residual; Caldera pirotubular; Eficiencia energética; Sostenibilidad ambiental.

**ABSTRACT**

In recent years, cocoa has become the main growth driver among Ecuador's non-oil exports. This performance has enabled the country to maintain its leadership as the world's top cocoa exporter, with prospects of reaching record levels in export volumes. This growth has encouraged domestic chocolate-producing companies to optimize their processes under principles of energy efficiency and sustainability, in line with current environmental regulations, the national program *"Ecuador Carbono Cero"*, and the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly those related to responsible production, climate action, and the efficient use of resources. In this context, the present study proposes a waste heat recovery strategy applied to a diesel-fired fire-tube boiler used in a cocoa processing plant in the city of Guayaquil. A theoretical model was developed based on energy balances and thermophysical properties, considering the implementation of a shell-and-tube water economizer in the exhaust gas outlet line. The results show an energy recovery of 97,305.46 kJ/h, which allows increasing the feedwater temperature from 33.65 °C to 58.43 °C and reducing the flue gas temperature from 211.73 °C to 150 °C. This translates into an estimated annual savings of 5,544.023 liters of diesel, with a payback period of less than three years. Beyond the economic benefit, the results highlight a significant reduction in greenhouse gas emissions, underscoring the need for a more sustainable and efficient approach within the cocoa sector.

**Keywords:** Cocoa industry; Waste heat recovery; Fire-tube boiler; Energy efficiency; Environmental sustainability.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las calderas de combustión desempeñan un papel fundamental en la producción de vapor para diversas aplicaciones industriales y en la generación de energía. Desde su uso inicial en el siglo XVIII, su diseño ha evolucionado para mejorar la eficiencia térmica y alcanzar mayores temperaturas de operación (Etsap & Brief, 2010).

El mercado mundial de calderas industriales fue valorado en 15,55 mil millones de USD en 2024, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) proyectada del 4,9 % entre 2025 y 2030 (Grand View Research, 2025). En Ecuador, el diésel representa aproximadamente el 36,5 % del consumo total de combustibles en el sector industrial (Aldás et al., 2024).

En Ecuador, desde 2019, los precios de los combustibles han aumentado debido a la reducción de subsidios estatales (Zambrano & Pionce, 2023), lo que ha impactado directamente en los costos operativos industriales. Por tanto, es importante mejorar la eficiencia de los sistemas de generación térmica de vapor, ya que una parte significativa de la energía contenida en el combustible se pierde en forma de calor a través de los gases de combustión.

Entre las tecnologías disponibles, las calderas pirotubulares destacan por su amplia adopción en la industria, gracias a su versatilidad operativa, alta confiabilidad y buen equilibrio entre eficiencia térmica y costos de mantenimiento. Su uso se ha vuelto predominante en comparación con las calderas acuotubulares, debido a varias ventajas, como la menor necesidad de espacio para su instalación, menores costos de construcción (Khan, Mir, Abbas y Hussain, 2020), y un mayor volumen de agua almacenada, lo cual permite continuar la producción de vapor durante breves interrupciones en el suministro de agua (Ganapathy, 2002).

El principio de funcionamiento de las calderas pirotubulares se basa en la circulación de gases de combustión a través de tubos dispuestos longitudinalmente dentro de un haz tubular, totalmente sumergido en agua contenida en un cuerpo cilíndrico (Gutiérrez, 2011). Esta configuración permite una transferencia eficiente de calor desde los gases de combustión—que típicamente se encuentran entre 200 °C y 500 °C—al agua de la caldera, promoviendo así la generación de vapor. Este tipo de calderas ofrece una respuesta rápida ante fluctuaciones en la demanda térmica de los procesos industriales (Lahijani & Kalantari, 2018) y se emplea principalmente cuando la presión de operación es inferior a 22 bar (319 psi) (FENERCOM, 2012).

La eficiencia de estas calderas depende de la relación aire-combustible. Un suministro insuficiente de aire puede provocar combustión incompleta, lo que aumenta las emisiones de CO y partículas. Por el contrario, un exceso de aire genera pérdidas de energía debido a la reducción de la temperatura de la llama y al aumento de las emisiones de NOx (Wang et al., 2024).

Actualmente, la optimización convencional centrada únicamente en el diseño y las condiciones de operación ya no son suficientes. Para lograr una mejora en la eficiencia del proceso en general, es importante implementar estrategias que incluyan la recuperación de calor residual, con el objetivo de minimizar las pérdidas térmicas inherentes al proceso de combustión. Una de las principales fuentes de ineficiencia en estos sistemas es la energía térmica generada como subproducto de diversos procesos industriales, la cual en la mayoría de los casos no se aprovecha adecuadamente y se libera al ambiente como calor residual no recuperado (Jouhara et al., 2018).

Estas pérdidas energéticas pueden mitigarse mediante la implementación de tecnologías de recuperación de calor, siendo el rango de temperatura de los gases de combustión entre 200 °C y 500 °C el más adecuado para maximizar el potencial de recuperación de energía (Al-Rabghi, Beirutty, Akyurt, Najjar y Alp, 1993).

En este contexto, mejorar la eficiencia de una caldera industrial permite reducir el consumo de combustible, disminuyendo así los costos operativos. Un estudio realizado por Atabani et al. (2012) en Malasia sobre calderas industriales demostró que la incorporación de un economizador aumentó la eficiencia térmica en un 5.4 %, lo que se tradujo en un ahorro anual de energía de aproximadamente 2 529.779 kWh. Este ahorro representó un beneficio económico de RM 238 573. 00 por año, equivalente aproximadamente a 56 483.04 USD. La inversión necesaria para la instalación del economizador fue de RM 30 000 (aproximadamente 6 985.52 USD), y el análisis económico indicó un periodo de retorno de la inversión (ROI) cercano a los 3 años.

**Nomenclatura**

| | |
|---|---|
| $D_g$ | Diámetro del ducto de gases de combustión, m |
| $A_g$ | Área de la sección transversal del ducto de gases de combustión, m² |
| $v$ | Velocidad de salida de los gases de combustión, m/s |
| $Q_g$ | Caudal volumétrico de los gases de combustión, m³/s |
| $M$ | Peso molecular de los gases de combustión, kg/mol |
| $P$ | Presión de operación de los gases de combustión, Pa |
| $R$ | Constante universal de los gases, J/mol·K |
| $T$ | Temperatura de los gases de combustión, K |
| $\rho_g$ | Densidad de los gases de combustión, kg/m³ |
| $y$ | Fracción molar |
| $\dot{m}_g$ | Flujo másico de los gases de combustión, kg/s |
| $Q_w$ | Caudal volumétrico de agua de alimentación, m³/s |
| $\dot{m}_v$ | Flujo másico del vapor, kg/s |
| $\dot{m}_w$ | Flujo másico de agua de alimentación, kg/s |
| $\dot{Q}_g$ | Calor transferido por los gases de combustión, KJ/s |
| $C_{pg}$ | Calor específico de los gases de combustión, kJ/kg·°C |
| $C_{pw}$ | Calor específico del agua de alimentación, kJ/kg·°C |
| $\Delta T_g$ | Delta de temperatura de los gases, °C |
| $\Delta T_w$ | Delta de temperatura del agua de alimentación, °C |
| $LHV$ | Poder calorífico inferior del diésel, kJ/kg |
| $\rho_d$ | Densidad del diésel, kg/m³ |
| E | El valor de emisiones totales determinadas en el inventario, kg CO2eq/año |
| GWP | Potencial de calentamiento global de cada una de las fuentes, dependiendo del tipo de gas GEI que ha sido identificado, CO2eq/kg GEI |
| F | El factor de emisión expresado en kg GEI/Unidad de dato de actividad. |
| C | Factor de conversión combinado de cada fuente en relación con el dato de actividad asociado. Sus unidades son particulares para cada caso. |
| D | Dato de actividad asociado a la determinación de emisiones de GEI para cada una de las fuentes expresadas. Se expresa en Unidades de dato de actividad/ tiempo. |

Los economizadores son dispositivos de recuperación de energía comúnmente diseñados como intercambiadores de calor que capturan la energía térmica de los gases de combustión y la transfieren al agua de alimentación antes de que esta entre en la caldera (Dzierwa et al., 2024). Como resultado de este intercambio térmico, la temperatura de los gases disminuye mientras que la del agua de alimentación aumenta, como se ilustra en la Figura 1.

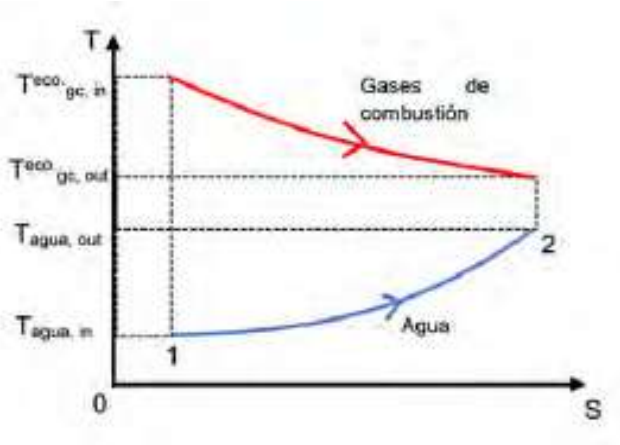



*Figura 1 Curva típica de los gases de combustión y del agua de alimentación, posterior a la instalación de un economizador en el sistema de caldera. Referencia (Elaboración propia)*

Entre los distintos tipos de intercambiadores de calor, las configuraciones de tipo carcasa y tubos son las más utilizadas en aplicaciones industriales debido a su robustez, flexibilidad de diseño y capacidad para operar en condiciones de contraflujo, lo que maximiza la transferencia de energía entre los fluidos (Dudkiewicz & Szałański, 2019; Trojan & Granda, 2018). Estos sistemas permiten una amplia gama de configuraciones, incorporando tanto tubos lisos como aleteados, lo que posibilita su adaptación a los requerimientos específicos de cada proceso. En particular, para gases de combustión, se recomienda el uso de tubos aleteados, ya que incrementan la superficie de transferencia de calor y mejoran la eficiencia térmica (Chopade, 2018; Trojan & Granda, 2018).

La integración de un economizador en una caldera pirotubular puede aumentar su eficiencia térmica en aproximadamente un 3.5%, dependiendo de su capacidad de diseño y condiciones de operación (Chopade, 2018). Se estima que entre el 10% y el 30% del calor total generado por una caldera se pierde a través de los gases de combustión (Lumpur, 2011). Por ello, el uso de economizadores o intercambiadores de calor constituye una estrategia adecuada para mitigar las pérdidas asociadas a los sistemas de combustión, permitiendo un mayor aprovechamiento de la energía disponible (Ganapathy, 2002; Wang et al., 2024). En la Figura 2 se presenta un diagrama esquemático del sistema de producción de vapor donde se ecnuentra la caldera con la integración del economizador.

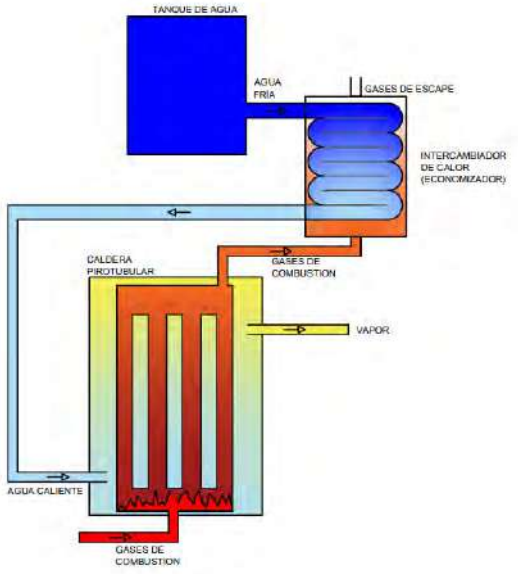



*Figura 2 Diagrama esquemático del funcionamiento de una caldera pirotubular equipada con un economizador para la recuperación de calor residual. Referencia: (Elaboración propia)*

En Ecuador, el sector industrial enfrenta el desafío de optimizar sus procesos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en cumplimiento con los compromisos establecidos mediante el Acuerdo Ministerial para la implementación del Programa Ecuador Carbono Cero (PECC). Este acuerdo destaca que la implementación de tecnologías para la recuperación y aprovechamiento del calor residual en los procesos industriales está alineada con los compromisos internacionales del Acuerdo de París para limitar el calentamiento global (MAATE, 2022), así como con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En este contexto, se promueve una industria más eficiente energéticamente y ambientalmente responsable.

Actualmente, el sector cacaotero se consolida como una de las industrias productivas más relevantes del país, en un contexto global donde los precios del cacao superan los 10,000 USD por tonelada, impulsados por la limitada oferta y la creciente demanda. Ecuador ha incrementado sus ingresos por exportación de cacao en más de 1 000 millones de dólares anuales, posicionándose como el tercer mayor exportador de cacao del mundo. Este escenario ubica al cacao como uno de los principales productos agrícolas del país, superando incluso a cultivos tradicionales como el banano y las flores (Ortiz & Ochoa, 2024). Por lo tanto, la implementación de estrategias enfocadas en la eficiencia energética y la reducción de costos operativos, a través de sistemas de recuperación de calor residual, surge como una alternativa técnica y ambientalmente viable.

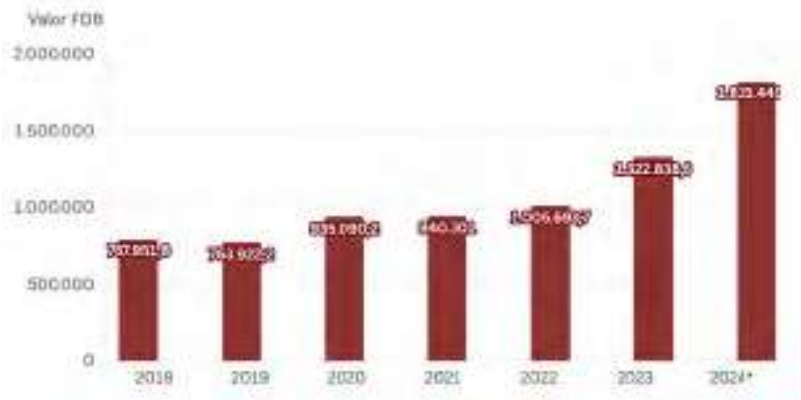



*Figura 3 Evolución de las Exportaciones de Cacao y sus Derivados en Ecuador: Crecimiento del 130% en el Valor FOB entre 2018 y los Primeros Ocho Meses de 2024. Referencia: (Ortiz & Ochoa, 2024)*

El presente estudio se enfoca en una caldera pirotubular que opera con diésel, ubicada en una planta industrial de la provincia del Guayas, dedicada a la producción de derivados del cacao. En esta planta, el vapor generado se utiliza en los procesos de prensado y tostado de los granos de cacao. La caldera opera con agua de alimentación a una temperatura aproximada de 32.38 °C, mientras que los gases de combustión se liberan a una temperatura aproximada de 211.75 °C. Este diferencial térmico evidencia un alto potencial para implementar un sistema de recuperación de calor, mediante el cual se podría precalentar el agua de ingreso, mejorando la eficiencia térmica y reduciendo el consumo de combustible.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Modelo de recuperación de calor residual mediante economizadores

Este estudio desarrolla un modelo teórico para cuantificar el potencial de recuperación de calor residual mediante la implementación de un economizador en una caldera pirotubular industrial FULTON VPM 60, con una capacidad aproximada de 927 L y una producción de vapor de 2.070 Lb/h, en la Figura 4 se presenta la caldera objeto del presente estudio. La propuesta busca mejorar la eficiencia térmica del sistema a través del precalentamiento del agua de alimentación, utilizando como fuente energética los gases de combustión que normalmente son liberados a la atmósfera sin aprovechamiento.



*Figura 4 Sistema de generación de vapor con caldera pirotubular ubicado en Guayaquil, empleado como base para el levantamiento de datos y análisis experimental.*

La metodología se fundamenta en un balance de energía entre el calor cedido por los gases de combustión y el aumento de temperatura del agua de alimentación, considerando restricciones técnicas como la temperatura mínima de salida de los gases, la cual debe mantenerse por encima del punto de rocío ácido para prevenir corrosión en los componentes metálicos del sistema.

### 2.2. Características operativas de la caldera

Para el presente estudio se consideró el régimen operativo real de la caldera, correspondiente a jornadas de 8 horas diarias, en concordancia con el horario laboral vigente al momento de la toma de datos. Las mediciones de temperatura y presión se realizaron de manera continua durante un turno diurno, con el fin de obtener valores representativos de las condiciones típicas de operación.

En la Tabla 1 se presentan las condiciones ambientales registradas durante la campaña experimental, mientras que en la Tabla 2 se resumen las temperaturas características del agua de alimentación y de los gases de combustión, medidas en distintos intervalos de operación de la caldera.

*Tabla 1 Condiciones Ambientales de Operación del lugar donde se ubica la caldera pirotubular*

| | | |
|---|---|---|
| Temperatura | 29.1 | C |
| Presión | 14.63<br>100.87 | Psi<br>KPa |

Para la obtención de los datos de temperatura, velocidad y volumen de los gases de combustión se empleó el analizador portátil Testo 350, en conjunto con el software especializado testo easyEmission. Los sensores fueron instalados directamente en el ducto de la chimenea, lo que permitió registrar los valores en condiciones reales de operación. Este procedimiento permitió la recolección de datos representativos del comportamiento de los gases de escape, constituyendo la base para el análisis del potencial de recuperación de calor mediante el uso de un economizador.




*Figura 5 a) Testo 350 para toma de datos. b) Lectura de datos con el software testo easyEmission. c) Ubicación de los sensores en el ducto de salida de los gases de combustión.*

*Tabla 2 Temperaturas del agua y los gases de combustión de la Caldera pirotubular*

| | Agua de ingreso | Gases de combustión |
|---|---|---|
| | T ( ºC ) | T ( ºC ) |
| | 27.7 | 194.2 |
| | 31.5 | 217.3 |
| | 37 | 217 |
| | 33.35 | 218.5 |
| Promedio | 32.38 | 211.75 |

Durante un turno típico de operación de 8 horas, se realizó la toma de datos del consumo de diésel, obteniendo un valor promedio aproximado de 92.1 litros como se indica en la Tabla 3, lo que equivale a un consumo horario de 11.51 litros.

*Tabla 3 Consumo de diésel*

| | Consumo diésel (L) |
|---|---|
| | 122.0 |
| | 83.9 |
| | 83.9 |
| | 78.5 |
| Promedio | 92.1 |

El sistema opera en ciclos térmicos de aproximadamente 15 minutos, durante los cuales el quemador permanece activo aproximadamente 3.5 minutos por ciclo. Durante una hora de operación, la caldera

completa cuatro ciclos térmicos, lo que implica un tiempo efectivo de combustión de 14 minutos por hora.

### 2.3. Modelo teórico de recuperación de calor

Para estimar el flujo másico de los gases de combustión, se utilizó un valor promedio para la velocidad de 7.4 m/s, obtenida mediante medición directa con el equipo Testo 350 en la chimenea de descarga con un diámetro de tubería de 12 in.

Se calcula el área transversal del ducto:

$$A_g = \frac{\pi * D_g^2}{4} \qquad (1)$$

El caudal volumétrico de los gases es:

$$Q_g = v * A_g \qquad (2)$$

Los datos de operación de la Tabla 3 fueron obtenidos mediante la medición en campo con el equipo Testo 350, colocado en los ductos de salida de los gases de combustión de la caldera.

*Tabla 4 Condiciones de operación de los Gases de Combustión en la Caldera Pirotubular de la Planta de Guayaqui.*

| Gas | % Volumen | Fracción Molar (y) | Mª (g/mol) | (M*y) |
|---|---|---|---|---|
| $N_2$ | 81.92503 | 0.8192503 | 28.02 | 22.95539 |
| $O_2$ | 11.52694 | 0.1152694 | 32.00 | 3.68862 |
| $CO_2$ | 6.51668 | 0.0651668 | 44.01 | 2.86799 |
| CO | 0.01415 | 0.0001415 | 28.01 | 0.00396 |
| $NO_x$ | 0.00391 | 0.0000391 | 46.01 | 0.00180 |
| $SO_2$ | 0.00691 | 0.0000691 | 64.06 | 0.00443 |

Note: El peso molecular de los gases (Mª) fue obtenido de (Robert & Don, 2012)

La densidad de los gases de combustión se determina mediante los datos resumidos en la Tabla 3 y calculados por la ecuación de los gases:

$$\rho_g = \frac{M * P}{R * T} \qquad (3)$$

El peso molecular medio (M) se calcula:

$$M = \sum (y_i * M_i) \qquad (4)$$

Los gases de combustión son eliminados a la atmósfera por la chimenea del caldero; por lo tanto, la presión del sistema es de 14.634 psi, correspondiente a los datos ambientales presentados en la Tabla 1. Para la constante de los gases se utiliza el valor de R = 8.314 J/mol·K.

Con la densidad promedio de los gases de combustión de 0.7398 kg/m³, el flujo másico es calculado mediante la ecuación:

$$\dot{m}_g = \rho_g * Q_g \qquad (5)$$

El caudal volumétrico de agua de alimentación se determinó bajo un enfoque ideal, asumiendo que las posibles pérdidas por fugas en el sistema de generación de vapor son insignificantes y, por lo tanto, pueden despreciarse en el cálculo. El agua de alimentación circula a través de una tubería de 1 pulgada de diámetro, presentando una densidad de 994.39 kg/m³ a una temperatura de 33.65 °C.

Adicionalmente, se considera el valor del flujo másico de vapor indicado en la ficha técnica de la caldera, correspondiente a 939 kg/h, como referencia para el análisis energético.

$$\dot{m}_v = \dot{m}_w = 939 \frac{Kg}{h}$$

Para prevenir la corrosión ácida por condensación de los gases, la temperatura mínima del gas a la salida del economizador se recomienda mantenerse por encima de 300 °F (148.9 °C) (David N. French, 2022).

Considerando una temperatura de entrada al economizador de 211.73 ºC y una temperatura de salida de 150 °C, el calor específico de los gases de 1.10 KJ/Kg ºC (Cengel & Boles, 2011), se calcula el calor por unidad de tiempo mediante la ecuación:

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g * C_{pg} * \Delta T \qquad (6)$$

$$\dot{Q}_g = 0.3980 \frac{kg}{s} * 1.10 \frac{kJ}{kg\ °C} * (211.73 - 150)\ °C$$

Para el incremento de la temperatura en el agua de ingreso $\Delta T_w$, la ecuación de transferencia de calor se aplicó bajo los siguientes supuestos: el calor específico del agua interpolando los datos para una temperatura ambiental de 29.1ºC es de $C_{pw} = 4.1813\ \mathrm{kJ/kg \cdot C}$ (Cengel & Boles, 2011) y se considera que el flujo de calor generado por los gases de combustión es igual al flujo de calor ganado por el agua $\dot{Q_w} = \dot{Q_g} = 27.0293\ \mathrm{kW}$.

$$\dot{Q_w} = \dot{m}_w * C_{pw} * \Delta T_w \qquad (7)$$

$$\Delta T_w = \frac{\dot{Q}_g}{\dot{m}_w * C_{pw}}$$

### 2.4. Estimación del ahorro energético

El calor generado equivalente es:

$$\dot{Q}_g = 27.0293 \frac{kJ}{s} * 3600\ s = 97\,305.4641\ \frac{kJ}{h}$$

Dado que el poder calorífico inferior (PCI) del diésel es aproximadamente 43,000 kJ/kg y su densidad es 0.849 kg/L (Szymkowicz & Benajes, 2018), el volumen de diésel ahorrado es:

$$Ahorro\ \left(\frac{L}{h}\right) \approx \frac{\dot{Q}_g}{LHV * \rho_d}$$

Para estimar el ahorro económico, se considera que el precio del diésel para uso industrial es de USD 3.212729 por galón, equivalente a 3.78 litros (Petroecuador, 2024):

$$Precio\ diesel = 0.8487\ USD/L$$

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Tabla 4** se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis matemático. En ella se detallan los valores correspondientes al flujo de agua, flujo másico y caudal de los gases, área transversal del ducto y densidad de los mismos. Estos parámetros permitieron calcular el calor generado por los gases $\dot{Q}_g$ y, a partir de ello, estimar el ahorro de combustible alcanzado con la implementación del economizador.

*Tabla 5 Resumen de los resultados obtenidos.*

| Resultados | | |
|---|---|---|
| $A_g$ | 0.07 | $m^2$ |
| $Q_g$ | 0.54 | $\frac{m^3}{s}$ |
| $\rho_g$ | 0.74 | $\frac{Kg}{m^3}$ |

| | | |
|---|---|---|
| $\dot{m}_g$ | 0.40 | $\frac{Kg}{s}$ |
| $\dot{m}_w$ | 0.26 | $\frac{Kg}{s}$ |
| $\dot{Q}_g$ | 27.03 | $\frac{KJ}{s}$ |
| $\Delta T_w$ | 24.78 | °C |
| $\dot{Q}_g$ | 97 305.46 | $\frac{kJ}{h}$ |
| $Ahorro$ | 2.67 | $\frac{L}{h}$ |

Los resultados obtenidos mediante los datos tomados en campo presentados en la Figura 4 muestran valores específicos donde los gases de combustión descienden de 211.73°C a 150°C, mientras que al agua de alimentación se incrementaron 24.78 ºC pasando la temperatura de 33.65 °C a 58.43 °C. En comparación a la curva observada en la Figura 1 se puede notar que las pendientes de la Figura 6 son menos pronunciadas, lo cual responde a las pérdidas térmicas inevitables en condiciones reales, como la disipación de calor al ambiente.

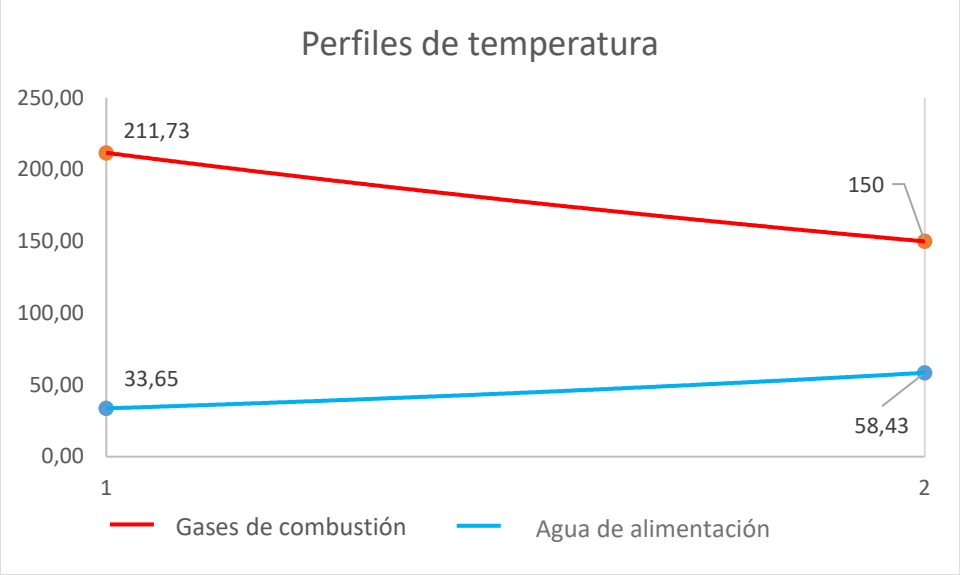



*Figura 6 Diagrama de los perfiles de temperatura de los gases de combustión y del agua de alimentación, posterior a la instalación de un economizador en el sistema de caldera. Referencia: (Elaboración propia)*

Ahorro económico:

*Tabla 6 Ahorro económico por periodo de tiempo de trabajo*

| Periodo | Ahorro de combustible (L) | Ahorro económico (USD) |
|---|---|---|
| Diario | 21.3231 | 18.0973 |
| Mensual | 469.1090 | 398.1402 |
| Anual | 5 544.0153 | 4 705.2937 |

Note: Los cálculos fueron realizados tomando en cuenta un periodo de trabajo de 8 horas, con 22 días laborables en el mes y 260 días laborables en el año para Ecuador

La disminución del consumo de diésel derivada de la estrategia para el aprovechamiento de calor residual de una caldera pirotubular, reduce de forma directa las emisiones de GEI ($CO_2$) asociadas a la combustión. Para cuantificar el impacto ambiental de la estrategia propuesta se empleó el enfoque metodológico recomendado por el IPCC (2006) y la EPA (2022). En el presente estudio, la fuente de

emisiones considerada corresponde al consumo de diésel en la caldera pirotubular. El dato de actividad DDD se definió como el volumen anual de combustible evitado gracias a la recuperación de calor, equivalente a 5 544 L/año. El factor de emisión consolidado para la combustión estacionaria de diésel es de 2.68 kg $CO_2$ L-1, mientras que el GWP para el dióxido de carbono es igual a 1 (IPCC, 2006).

$$E = \sum_{i=1}^{i=N} GWP_i * F_i * C_i * D_i \quad (9)$$

$$E_{CO_2} = 1 \times 2.68 \frac{kgCO_2}{L} \times 5\,544\ L = 14\,864\ \frac{kgCO_{2eq}}{año}$$

## 4. CONCLUSIONES

La implementación de un economizador en la caldera pirotubular analizada permitió recuperar aproximadamente 97,305 kJ/h de energía térmica, lo que se tradujo en un incremento superior a 20 °C en la temperatura del agua de alimentación. Este resultado confirma el potencial de los sistemas de recuperación de calor residual para optimizar la eficiencia energética en procesos industriales con alta demanda de vapor.

En términos de consumo de combustible, el sistema posibilita un ahorro estimado de 5,544 litros de diésel por año, equivalente a un beneficio económico cercano a 4,712 USD anuales. El periodo de retorno de inversión proyectado es inferior a tres años, lo que demuestra la viabilidad financiera de la propuesta incluso en escenarios de volatilidad de precios de los combustibles.

Más allá de los beneficios técnicos y económicos, la estrategia contribuye de manera significativa a la sostenibilidad ambiental. La reducción estimada de 14.85 toneladas de $CO_2$ equivalente por año representa un aporte directo a la mitigación del cambio climático, en línea con los compromisos internacionales del Acuerdo de París y con los objetivos del Programa Nacional “Ecuador Carbono Cero”.

Los resultados de este estudio evidencian que el aprovechamiento de calor residual en calderas industriales puede convertirse en una práctica de referencia dentro del sector cacaotero ecuatoriano y en otras ramas manufactureras con características operativas similares. Su adopción no solo fortalecería la competitividad de las empresas a nivel internacional, sino que también consolidaría la imagen del país como un productor comprometido con la eficiencia energética, la descarbonización y la producción responsable.

## 5. REFERENCIAS


Al-Rabghi, O. M., Beirutty, M., Akyurt, M., Najjar, Y., & Alp, T. (1993). Recovery and utilization of waste heat. *Heat Recovery Systems and CHP*, *13*(5), 463–470. https://doi.org/10.1016/0890-4332(93)90047-Y

Atabani, A. E., Saidur, R., Silitonga, A. S., & Mahlia, T. M. I. (2012). Energy economical and environmental analysis of industrial boilers using VSD. *Applied Mechanics and Materials*, *110–116*(January), 3223–3233. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.3223

CENGEL, Y., & CIMBALA, J. (2019). FLUID MECHANICS FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(1), 186–190. Retrieved from http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI

Chopade, M. M. (2018). Thermal Design of Economizer for Waste Heat Recovery Boiler ( WHRB ). *International Journal of Engineering Research and Technology*, *7*(10), 96–102. Retrieved from http://www.ijert.org

David N. French, P. R. D. (2022). The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors. *1992 Addenda*. Retrieved from https://www.nationalboard.org/SiteDocuments/NB-57.pdf

Dudkiewicz, E., & Szałański, P. (2019). *A review of heat recovery possibility in flue gases discharge system of gas radiant heaters*. *00017*.

Dzierwa, P., Trojan, M., Peret, P., Taler, J., Taler, D., Kaczmarski, K., … Bator, J. (2024). Technological and economical analysis of the heat recovery system from flue gas in a thermal waste treatment plant. *Energy*, *307*(July), 132708. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132708

Etsap, I. E. A., & Brief, T. (2010). *Industrial Combustion Boilers*. (May), 1–5.

Ganapathy, V. (2002). Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators. In *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators*. https://doi.org/10.1201/9780203910221

Grand View Research. (2025). *Industrial Boiler*.

Gutiérrez, F. J. (2011). Modeling of fire-tube boilers. *Applied Thermal Engineering*, *31*(16), 3463–3478. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.07.001

FENERCOM. (2012). Calderas industriales eficientes. *Guía Básica de Calderas Industriales*, *3*, 71–95. Retrieved from https://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion/CentrodeFichas/Documents/descripcion-de-caldera-y-generadores-de-vapor.pdf

IPCC. (2006). *IPCC*. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html

Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 6, pp. 268–289. Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017

Khan, H., Mir, U., Abbas, H., & Hussain, S. (2020). *Designing of a Fire Tube Boiler*. (July).

Lahijani, A. M., & Kalantari, F. (2018). *A REVIEW OF INDIRECT METHOD FOR MEASURING THERMAL*. *34*(1), 1825–1832.

Ortiz, L., & Ochoa, G. (2024, October 27). Boom cacaotero: ¿cómo puede aprovechar Ecuador esta nueva época dorada? *Gestion Digital*. Retrieved from https://revistagestion.primicias.ec/analisis-economia-y-finanzas/boom-cacaotero-como-puede-aprovechar-ecuador-esta-nueva-epoca-dorada/?utm_source=chatgpt.com

Lumpur, K. (2011). *ENERGY SAVINGS AND EMISSION REDUCTIONS*. *15*(3), 705–719. https://doi.org/10.2298/TSCI091014046S

MAATE. (2022). *Año I - Nº 129 - 48 páginas Quito, jueves 18 de agosto de 2022*. Ecuador.

Petroecuador. (2024). Estructura-De-Precios-Diciembre-2023. *Petroecuador*, pp. 1–1.

Robert, P., & Don, G. (2012). *Perry ' s Chemical Engineers ' Handbook*.

Szymkowicz, P. G., & Benajes, J. (2018). Development of a Diesel Surrogate Fuel Library. *Fuel*, *222*(January), 21–34. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.112

Tang, W., Feng, H., Chen, L., Xie, Z., & Shi, J. (2021). Constructal design for a boiler economizer. *Energy*, *223*, 120013. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120013

Trojan, M., & Granda, M. (2018). *Modeling of the boiler economizer*. *05034*, 1–7.

Wang, H., Yang, X., Li, Z., Zhang, C., Zhu, X., Zhang, R., … Zhang, S. (2024). Numerical Investigation on the Effect of Air Humidification and Oxygen Enrichment on Combustion and Emission Characteristics of Gas Boiler. *Processes*, *12*(10). https://doi.org/10.3390/pr12102282

Zambrano, A. D. J., & Pionce, M. E. (2023). La intervención de la administración pública en los subsidios de los combustibles del Ecuador. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria. ISSN 2602-8166*, *7*(1), 85–102. https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v7.n1.2023.704

**Agradecimientos**

Este trabajo formó parte del proyecto de investigación *"Estudio del impacto en la implementación de medidas de eficiencia energética en el sector agroindustrial"*. El proyecto fue desarrollado por el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) con el apoyo financiero de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), Subvención No: 2023QdV00248.

# EXOESQUELETOS PASIVOS: UN ANÁLISIS DE TENDENCIAS GLOBALES Y OPORTUNIDADES FUTURAS

Guagliano[1-2], Miguel; Miralles[1-3], Monica

*[1]-Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Pontificia Universidad Católica Argentina, Argentina*
*[2]- Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Argentina*
*[3]- Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires, Argentina*
*monica_miralles@uca.edu.ar; mlguagliano@uca.edu.ar*

**RESUMEN**

En el sector industrial, los exoesqueletos pasivos representan una tecnología innovadora de asistencia a tareas repetitivas frecuentemente asociadas a desórdenes muscoloesqueléticos específicos. Estos dispositivos ayudan a reducir la carga física y mejorar la eficiencia biomecánica en tareas necesarias en diferentes sectores de la industria.

El presente trabajo presenta las principales tendencias globales en la robótica de exoesqueletos pasivos de uso industrial.

La metodología utilizada, basada en vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva, permitió recolectar y analizar grandes volúmenes de información científica - tecnológica en forma sistemática. De este modo se lograron identificar los nichos de investigación más significativos en asistencia robótica industrial (materiales, mecanismos y diseño), junto a los principales actores (instituciones y empresas), a partir de estrategias como el patentamiento a nivel global.

Los resultados de este trabajo arrojaron una visión integral de la evolución reciente de los exoesqueletos de uso industrial, destacando las áreas tecnológicas de mayor desarrollo, los niveles del conocimiento alcanzado y las oportunidades de innovación.

El análisis de publicaciones científicas y patentes reveló patrones de desarrollo, focos de investigación y la distribución geográfica a nivel global de esta tecnología innovadora, para poder orientar la toma de decisiones estratégicas en I+D+i, en particular, en la industria argentina.

**Palabras Claves:** Exoesqueletos Pasivos, Vigilancia Tecnológica, Inteligencia Competitiva, Robótica, Biomecánica Ocupacional.

**ABSTRACT**

In the industrial sector, passive exoskeletons represent an innovative technology to assist repetitive tasks often associated with specific musculoskeletal disorders. These devices help to reduce physical load and improve biomechanical efficiency in tasks required in different industry sectors.

This paper presents the main global trends in industrial passive exoskeleton robotics.

The methodology used, based on technological surveillance and competitive intelligence, allowed the systematic collection and analysis of large volumes of scientific and technological information. In this way, the most significant research niches in industrial robotic assistance (materials, mechanisms and design) were identified, together with the main actors (institutions and companies), based on strategies such as global patenting.

The results of this work provide a comprehensive view of the recent evolution of industrial exoskeletons, highlighting the technological areas with the greatest development, the levels of knowledge achieved, and innovation opportunities.

The analysis of scientific publications and patents revealed development patterns, research focus areas, and the global geographical distribution of this innovative technology, which can guide strategic R&D and innovation decision-making, particularly within Argentine industry.

**Keywords:** Passive Exoskeletons, Technological surveillance, Competitive Intelligence, Robotics, Occupational Biomechanics.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Exoesqueletos

En los últimos años, ha cobrado relevancia la incorporación de tecnologías portables, como los exoesqueletos. Estos asistentes permiten una interacción entre el cuerpo humano y los sistemas mecánicos. Diversos estudios han señalado que la integración de estos dispositivos puede contribuir significativamente a reducir el esfuerzo físico, mejorar la ergonomía y prevenir lesiones musculoesqueléticas en entornos laborales exigentes (de Looze et al., 2016; Toxiri et al., 2019).

Los exoesqueletos constituyen una clase de sistemas robóticos portables (en inglés, wearable robotic systems) diseñados para intercambiar energía tanto con el entorno como con el cuerpo humano, con el propósito de aumentar, asistir o sustituir las funciones motoras humanas (Bai, Virk, & Sugar, 2018). También puede definirse como un dispositivo mecánico portable que se ajusta al cuerpo humano para aumentar, asistir o restaurar la función motora (Kazerooni, 2005). Su objetivo principal es extender, complementar, sustituir o potenciar funciones y capacidades humanas, así como también empoderar o reemplazar segmentos corporales para lograr una mayor eficiencia (Miralles et al., 2024).

Los exoesqueletos se pueden clasificar por su sistema de actuación en:

- **Exoesqueletos Activos:** Utilizan actuadores (motores eléctricos, neumáticos o hidráulicos) y sensores para generar fuerza y movimiento, a menudo controlados por complejos algoritmos.
- **Exoesqueletos Pasivos:** No incorporan actuadores ni fuentes de energía externas. Su funcionamiento se basa en elementos mecánicos para almacenar y liberar energía, redistribuir cargas o guiar el movimiento de forma no motorizada (Agrawal et al., 2017).

### 1.2. Exoesqueletos pasivos y su aplicación industrial

Los exoesqueletos pasivos son dispositivos mecánicos externos que proporcionan soporte estructural al cuerpo humano sin utilizar fuentes de energía externa. Estos sistemas se basan en mecanismos mecánicos y elásticos como resortes, amortiguadores o fuerzas de contra balance para asistir movimientos específicos y reducir la carga física sobre músculos y articulaciones (Agrawal et al., 2017).

Sus características distintivas son: Ausencia de fuente externa, peso reducido, soporte dinámico y diseño ergonómico.

Su simplicidad les otorga ventajas notables frente a los modelos activos, tales como: menor costo de fabricación y mantenimiento, menor peso y volumen, mayor fiabilidad al tener menos componentes móviles, autonomía ilimitada (al no requerir baterías), mayor seguridad intrínseca al evitar movimientos descontrolados y facilidad de uso por la mínima necesidad de calibración (Young & Ferris, 2017; Agrawal et al., 2017).

El potencial de estos dispositivos abarca múltiples ámbitos:

- Industria y logística: Reducen la carga física en tareas repetitivas, levantamiento de cargas o posturas incómodas (Bosch et al., 2016; Koopman et al., 2019).
- Salud y rehabilitación: Asisten la movilidad en personas con debilidad muscular leve y facilitan la terapia de rehabilitación (Agrawal et al., 2017).
- Militar: Disminuyen la carga metabólica al transportar equipo pesado y mejoran la resistencia (Walsh et al., 2006).
- Vida cotidiana y deporte: Ayudan en actividades como subir escaleras, caminar largas distancias o prevenir lesiones en prácticas deportivas (Collins et al., 2015).

Tal como se mencionó anteriormente, los exoesqueletos están teniendo un importante campo de aplicación en las industrias a nivel global. A partir de esto, podemos definir a un exoesqueleto industrial como una estructura externa que asiste al operario en la realización de tareas físicas. Se clasifican según la zona corporal de aplicación por ejemplo, espalda, extremidades superiores e inferiores, etc.

Estos dispositivos se organizan en categorías funcionales: asistencia de espalda (soporte lumbar en levantamiento), asistencia de hombros/brazos (para trabajo en altura o herramientas pesadas), soportes para herramientas y asistencia en piernas (Marinov, 2015). Los exoesqueletos de asistencia

para la espalda se emplean principalmente para proporcionar soporte a la región lumbar de la columna vertebral, facilitar el mantenimiento de una postura ergonómica y asistir durante tareas de levantamiento de cargas o sujeción prolongada en posiciones estáticas (De Looze et al., 2016). Por su parte, los exoesqueletos diseñados para asistencia en hombros y aquellos de soporte supernumerario para herramientas manuales (no antropomórficos) están destinados a sostener las extremidades superiores durante tareas prolongadas por encima del nivel de la cabeza o para ayudar a soportar el peso de herramientas pesadas (Rashedi et al., 2014). En cuanto a los dispositivos de asistencia para miembros inferiores, éstos ofrecen soporte a las articulaciones de la cadera, rodilla o tobillo durante movimientos simples o actividades que implican carga (Kim et al., 2014).

### 1.3. La robótica y los exoesqueletos

La robótica ha evolucionado desde sistemas rígidos y enfocados en tareas específicas hacia soluciones inteligentes, adaptables y colaborativas, impulsadas por inteligencia artificial, aprendizaje automático e integración de sensores (Sanneman, Fourie & Shah, 2020). Tradicionalmente, la robótica industrial se centraba en automatizar procesos repetitivos como soldadura, ensamblaje y embalaje en cadenas cerradas.

El desarrollo de los exoesqueletos robóticos se remonta a los años 60, cuando se comenzaron a diseñar prototipos como el proyecto Hardiman de General Electric o dispositivos de asistencia a la marcha humana.Sin embargo, su avance continuo se demoró debido a limitaciones técnicas y/o tecnológicas (EduExo, 2017). Inicialmente orientado a aplicaciones militares, alrededor de los 2000, estos sistemas comenzaron a utilizarse en rehabilitación —por ejemplo, los exoesqueletos Lokomat, ReWalk e Indego—, siendo los desarrollos para aplicaciones industriales de aparición más reciente (EduExo, 2017).

Actualmente, los exoesqueletos conforman una categoría distintiva de la robótica portátil. A diferencia de los robots autónomos, estos dispositivos responden directamente a la intención o a la biomecánica del usuario, ya sea mediante sensores, o bien, mediante mecanismos pasivos.

En base a todo lo descrito anteriormente, este estudio tiene como objetivo analizar el estado del arte de las principales tendencias globales en la robótica de exoesqueletos pasivos de uso industrial. A través de una metodología de Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva, se abordarán cuestiones científicas, tecnológicas y competitivas. Este análisis busca proporcionar una visión integral que sirva de base para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de estudio.

Se considera que identificar las tendencias globales clave en el campo de la robótica y de los exoesqueletos pasivos, los avances científicos más recientes, las tecnologías emergentes y el panorama competitivo es una tarea crucial para profundizar la comprensión de estas nuevas tecnologías, y de este modo poder profundizar las líneas de investigación en curso, valorar los desarrollos emergentes en el mercado poder orientar la toma de decisiones en la industria.

A continuación, se muestran las preguntas que han conducido al presente estudio:

- ¿Qué relación existe entre los principales titulares de patentes y las empresas que lideran el mercado global de exoesqueletos robóticos pasivos industriales?
- ¿Qué impacto tuvo la pandemia en las estrategias de patentabilidad de estos dispositivos a nivel global?
- ¿Existe correlación entre líderes en patentes y en producción científica en este campo?
- ¿Qué países lideran el desarrollo tecnológico y dónde buscan obtener protección de sus patentes?

## 2. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico aplicado en el presente trabajo de investigación está relacionado con el proceso de la Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva (VTeIC). La VTeIC constituyen un proceso organizado, selectivo y permanente de captación de información del entorno, su análisis y conversión en conocimiento para la toma de decisiones estratégicas.

La vigilancia tecnológica es un proceso sistemático y ético de recolección, análisis, difusión y utilización de información relacionada con aspectos científicos, tecnológicos, competitivos,

legislativos, normativos, económicos, el mercado, entre otros; con el fin de identificar oportunidades y amenazas para una organización o campo de estudio (Ashton & Klavans, 1997; Palop & Vicente, 1999). Es una herramienta estratégica fundamental para la toma de decisiones informadas en entornos de alta incertidumbre y rápida evolución tecnológica, como es el campo de los exoesqueletos para la industria.

Los objetivos principales de la VT incluyen:

- Anticipar la evolución de tecnologías y mercados.
- Detectar tecnologías emergentes y discontinuidades tecnológicas.
- Identificar a los actores clave (empresas, centros de investigación, investigadores, universidades, etc.).
- Evaluar las fortalezas y debilidades propias y de la competencia.
- Reducir el riesgo en la toma de decisiones de I+D+i.
- Identificar nuevas oportunidades para la gestión de I+D+i.

Por otra parte y de acuerdo a la Norma IRAM 50520, la inteligencia comprende el análisis, la interpretación y la comunicación de información de valor estratégico que se transmite a los responsables de tomar decisiones como elemento de apoyo para ajustar el rumbo y marcar posibles caminos de evolución de interés para las organizaciones.

El proceso de VTeIC generalmente sigue las siguientes fases (Rodríguez Salvador et al., 2002):

1. Planificación: Definición de los objetivos de la vigilancia, las áreas críticas a monitorear y las necesidades de información.

2. Recolección de Información: Búsqueda y captación de datos de diversas fuentes (bases de datos de patentes, publicaciones científicas, normativas, noticias, informes de mercado, sitios web de empresas, ferias tecnológicas, etc.).

3. Análisis y Tratamiento: Filtrado, clasificación, interpretación y validación de la información recolectada para convertirla en conocimiento útil. Esto puede incluir análisis bibliométricos, cienciométricos, de patentes, entre otros.

4. Difusión y Comunicación: Presentación de los resultados de forma clara y concisa a los interesados para facilitar la toma de decisiones.

5. Toma de decisiones: Implementación de acciones basadas en la inteligencia generada.

A continuación, se describen cada uno de los pasos de la metodología aplicada:

**Planificación: Definición y alcance del tema**

El presente estudio se enfoca en la búsqueda y análisis de información científica, tecnológica y comercial relacionada con la robótica de exoesqueletos pasivos a nivel global, con especial interés en su aplicación en entornos industriales. Desde el punto de vista de la robótica, el alcance de la investigación se ha delimitado a una serie de subtemas y tecnologías consideradas de alto impacto potencial en el desarrollo de exoesqueletos pasivos. Estas áreas incluyen: robótica en general, inteligencia artificial, mecatrónica, robots portátiles y biomecatrónica.

La selección de estos ejes temáticos responde a su relevancia en la evolución actual de los sistemas robóticos aplicados al cuerpo humano y en su aplicación en el campo industrial.

**Búsqueda y recolección de información**

Las fuentes de información seleccionadas fueron las siguientes:

- Lens Patentes: es una base de datos internacional de patentes de acceso abierto, desarrollada por The Lens, que proporciona acceso a más de 140 millones de documentos de patentes provenientes de oficinas como la USPTO (EE.UU.), EPO (Europa), WIPO (Organización Internacional de la Propiedad Intelectual) y otras. Ofrece herramientas avanzadas para la búsqueda, análisis, filtrado y visualización de información tecnológica.
- Lens Scholar: es una base de datos académica gratuita y de acceso abierto que permite buscar, analizar y visualizar literatura científica a nivel global. Ofrece acceso a millones de publicaciones académicas provenientes de fuentes como Microsoft Academic Graph, PubMed, CrossRef, CORE y otras. Está orientada a facilitar el análisis de conocimiento científico en combinación con datos de patentes, fomentando una visión integrada entre

ciencia y tecnología. Permite realizar estudios de vigilancia tecnológica, mapas de conocimiento y análisis de impacto académico.

Para la búsqueda en las bases de datos mencionadas anteriormente se han definido y formulado las siguientes palabras claves y ecuaciones de búsqueda:

*Tabla 1 Palabras claves y ecuaciones de búsqueda.*

| Fuente | Palabras clave | Ecuaciones | Resultados |
|---|---|---|---|
| Lens patentes | Exoskelett, exoskeletons, robotic, artificial intelligence, mechatronics, wereable robot, biomechatronic, biomechatronic wearable robots, passive. | (Exoskelett OR exoskeletons OR exoesqueleto) AND (robotic OR “artificial intelligence” OR machatronics OR “wereable robot” OR biomechatronic OR “biomechatronic wearable robots”) AND (passive OR pasivo) | 182 documentos de patentes |
| Lens Scholar | Exoskelett, exoskeletons, robotic, artificial intelligence, mechatronics, wereable robot, biomechatronic, biomechatronic wearable robots, passive, industry, industries. | (Exoskelett OR exoskeletons OR exoesqueleto) AND (robotic OR “artificial intelligence” OR machatronics OR “wereable robot” OR biomechatronic OR “biomechatronic wearable robots” OR robotica OR mecatronica OR biomecatronica OR “inteligencia artificial”) AND (passive OR pasivo) AND (industry OR industries OR industrial OR industria) | 36 investigaciones científicas |
| Metabuscadores y herramientas de IA (Carrot, Biznar, Perplexity) | Tendencias de mercado, principales competidores. | -- | -- |

Para la búsqueda de patentes e investigaciones científicas se limitó a los siguientes campos técnicos y periodo temporal:

- Patentes: Se analizaron los campos de título, resumen y reivindicaciones.
- Investigaciones científicas: Se consideraron los campos de título, resumen, palabras clave y área de estudio.
- Periodo temporal: El análisis abarcó publicaciones y patentes comprendidas entre los años 2015 y 2025.

**Análisis, tratamiento y validación de la información**

Los datos extraídos se procesaron cuantitativamente a través de la generación de un conjunto de indicadores que se realizaron con los resultados obtenidos y validados de patentes e investigaciones científicas, utilizando las funcionalidades gráficas que ofrecen las bases de datos empleadas. Por otra parte, los indicadores se complementaron con análisis cualitativos para identificar patrones científicos tecnológicos y comprender sobre las principales tendencias y oportunidades identificadas a nivel global en relación a los exoesqueletos robóticos pasivos de aplicación industrial. Por último, la validación de los resultados fue realizada mediante la interacción con especialistas y expertos en la temática con los cuales se vincula el equipo técnico del Laboratorio de Biomecánica e Ingeniería para la Salud (LaBis) de la Pontificia Universidad Católica Argentina.

## 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se exponen los principales indicadores generados a partir del análisis de los resultados de patentes, publicaciones científicas y del entorno competitivo.

### 3.1. Análisis tecnológico

La recopilación de datos reveló un marcado crecimiento mundial en el interés y desarrollo de la robótica de exoesqueletos pasivos industriales. En la Figura 1 se observa que la curva de patentabilidad en los últimos 10 años demuestra una tendencia ascendente constante.




*Figura 1 Evolución de solicitudes y patentes concedidas a nivel mundial. Fuente: Lens Patents.*

Durante el periodo de análisis se han identificado 182 documentos de patentes (solicitudes en trámite y patentes concedidas) relacionados con desarrollos de exoesqueletos pasivos con incorporación de componentes robóticos.

Un dato a destacar, y que empieza a dar inicio a una de las respuestas planteadas en el presente trabajo de investigación, es que los niveles de patentabilidad en pandemia y post pandemia no se han visto reducidos, sino que, por el contrario, han aumentado. Este hecho pone en evidencia, que el interés a nivel global por desarrollar nuevos dispositivos robóticos de exoesqueletos pasivos presenta una importante tendencia positiva al largo de los últimos 10 años, a pesar de que en términos globales, comparado con las patentes de exoesqueletos en general, es mucho menor.

El análisis de las oficinas de patentes revela que China lidera ampliamente los registros (67,5 %), seguida por Estados Unidos (14,3 %) (ver Figura 2). La intensidad de los colores marca el volumen de solicitudes de patentes que tienen los países, por ejemplo, el verde más oscuro (China) es el país líder y en color mas claro o blanco son los países que tienen baja cantidad o nula de solicitudes de patentes.



*Figura 2 Países de oficinas internacionales de patentes. Fuente: Lens Patents.*

En el ámbito latinoamericano, no se han detectado patentes relacionadas directamente con exoesqueletos pasivos industriales. Sin embargo, se encuentran antecedentes de solicitudes vinculadas a aplicaciones en terapias de rehabilitación, principalmente en México, Perú y Argentina.

La Tabla 2 presenta las principales tecnologías protegidas por estos solicitantes.

*Tabla 2 Principales tecnologías de exoesqueletos robóticos patentados.*

| Solicitante | País de origen | Patentes | Países estratégico de patentamiento |
|---|---|---|---|
| Sarcos Corp | Estados Unidos | Sistemas de módulos de articulación para las fases de movimiento del ensamblaje robótico de un exoesqueleto. | Estados Unidos<br>Japón<br>Corea<br>PCT<br>Oficina Europea |
| Harbin Institute Technology | China | Exoesqueleto combinado activo-pasivo para miembros inferiores: Asiste la cadera, rodilla y pie.<br>Exoesqueleto subactuado con poleas y cuerdas: Reduce peso y consumo energético en asistencia de miembros inferiores.<br>Exoesqueleto de marcha modular con elementos elásticos.<br>Exoesqueleto modular de hombro con transmisión por cuerdas. | China |
| Institute Automation CAS | China | Exoesqueleto de miembros superiores con autoajuste: Posee múltiples grados de libertad pasivos y mecanismos de conformidad para eliminar fuerzas parásitas y mejorar la asistencia. | China |
| Science & Technology-Nanjing University | China | Exoesqueleto lumbar que usa columna biónica, resortes y actuadores eléctricos.<br>Exoesqueleto lumbar con diseño compatible hombre-máquina: Emplea transmisión por cuerdas y resortes telescópicos para soporte activo y pasivo de la zona lumbar, reduciendo la carga en la espalda. | China |
| Hangzhou Chengtian Tech Dev Co. LTD. | China | Exoesqueleto de carga con asistencia en cintura y cadera.<br>Exoesqueleto de cintura con compatibilidad hombre-máquina: Combina mecanismos de transmisión por cuerdas y resortes telescópicos para reducir la carga lumbar y mejorar la postura.<br>Exoesqueleto flexible de rodilla con lasso compliant drive: Usa resortes y mecanismos elásticos que imitan fibras musculares para asistir flexión y extensión de la rodilla con mayor comodidad y seguridad.<br>Exoesqueleto de cintura-cadera con asistencia activa y pasiva: Mejora la ergonomía en trabajos de carga, permite movimientos naturales y reduce el esfuerzo en la zona lumbar y caderas. | China |

El análisis de las tecnologías clave demuestra que el número de desarrollos patentados específicamente orientados a exoesqueletos pasivos industriales sigue siendo bajo a nivel mundial. No obstante, se evidencia un creciente interés en su desarrollo, impulsado por la incorporación de nuevas tecnologías provenientes de la robótica y la inteligencia artificial, que prometen mejorar notablemente sus funcionalidades y prestaciones.

Por otra parte, se aprecia un claro liderazgo de universidades chinas en la generación de patentes, mientras que las empresas avanzan a un ritmo más lento, aunque con estrategias de protección más diversificadas, buscando monopolios transitorios en múltiples países, a diferencia de muchas universidades que sólo protegen sus desarrollos en su país de origen.

### 3.2. Análisis científico

Los resultados obtenidos a partir de la base de datos Lens Scholar evidencian un número limitado de estudios a nivel global sobre robótica aplicada a exoesqueletos pasivos para uso industrial. A partir de esta información, se realizó un análisis cuyos principales hallazgos se detallan a continuación.

La Figura 3 muestra un crecimiento sostenido en la producción científica sobre esta temática entre 2016 y 2025, con picos destacados en los años 2022 y 2023. Este comportamiento sugiere la existencia de ciclos de interés vinculados al avance tecnológico y a la consolidación del tema en la agenda de la comunidad científica. Este patrón mantiene cierta correspondencia —aunque en distinta magnitud— con la evolución observada en los registros de patentes (ver Figura 1), donde las solicitudes se incrementaron incluso durante la pandemia, lo que evidencia una sinergia entre la generación de conocimiento científico y el desarrollo tecnológico.

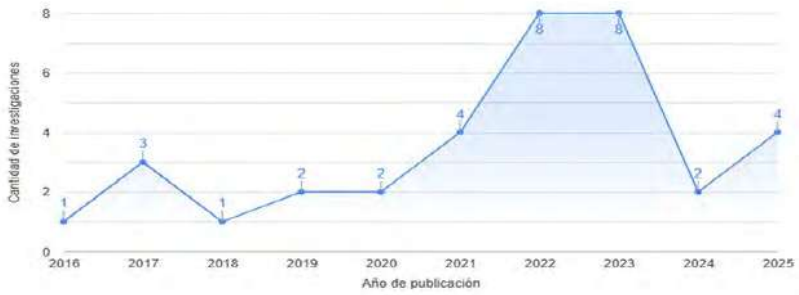



*Figura 3 Tendencias de investigaciones científicas. Fuente: Lens Scholar.*

Por otro lado, la tendencia de crecimiento en la producción científica también puede vincularse con los lineamientos de la Industria 5.0 y el enfoque emergente en tecnologías orientadas a la salud ocupacional. La adopción creciente de enfoques interdisciplinarios —como la robótica, la biomecánica y la inteligencia artificial— ha contribuido a la diversificación de los temas abordados y a su potencial aplicabilidad en entornos industriales.

Este comportamiento conjunto sugiere una retroalimentación positiva entre la generación de conocimiento científico y las estrategias de protección intelectual: un aumento en las publicaciones puede anticipar un crecimiento en el número de patentes, en función del modelo de innovación adoptado por los países o instituciones líderes. Por ejemplo, si bien China lidera ampliamente en el número de patentes (67,5 % del total), este liderazgo no se refleja en igual medida en la producción científica, lo que refuerza la hipótesis de diferentes estrategias nacionales en torno a la innovación.

En cuanto a la distribución geográfica, la Figura 4 muestra que Italia, Canadá, China, Alemania, Malasia, Estados Unidos, Austria y Bélgica lideran la producción científica, en concordancia con algunos de los países que también se destacan en generación de patentes (ver Figura 2).

La ausencia de países latinoamericanos en esta figura evidencia una brecha significativa en la investigación sobre exoesqueletos pasivos para uso industrial. Si bien existen publicaciones regionales en el campo de los exoesqueletos en general, estas son considerablemente menores cuando se trata específicamente de aplicaciones robóticas en entornos industriales.




*Figura 4 Países líderes en investigaciones de robótica en exoesqueletos para uso industrial. Fuente: Lens Scholar.*

Aunque el análisis cuantitativo no registró publicaciones indexadas de instituciones argentinas, se identificó que universidades como la Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA - LaBis), la Universidad de Buenos Aires (UBA – Facultad de Medicina) y la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM – Lab3Bio) están desarrollando investigaciones relacionadas. Estas instituciones podrían desempeñar un papel estratégico si logran articular sus líneas de investigación con procesos de

protección intelectual y transferencia tecnológica, particularmente en sectores industriales que requieren mejoras en ergonomía, salud ocupacional y automatización colaborativa.

Cabe destacar que el diseño ergonómico y la validación biomecánica aparecen entre los temas más abordados en la literatura científica, lo cual resulta clave para la aceptación del usuario y la eficacia de estos dispositivos en entornos de trabajo reales. La ciencia cumple así un rol fundamental en sustentar el desarrollo tecnológico, aportando evidencia para justificar inversiones en I+D+i en estos nuevos dispositivos.

### 3.3. Análisis competitivo

#### 3.3.1 Crecimiento y proyecciones del Mercado

De acuerdo a Al-Khiami et al. (2024) existen alrededor de 132 modelos distintos de exoesqueletos fabricados en 22 países por 72 empresas, con un claro énfasis en aplicaciones industriales (66 %) y de sanidad (33%). A su vez, entre 2014 y 2018 aumentó significativamente el número de nuevos modelos de exoesqueletos pasivos, con picos en 2018 y 2023. Este dato también tiene una correlación con lo ya observado y analizado en el caso de las patentes y las investigaciones científicas.

Según un informe de Fortune Business Insights, el segmento de exoesqueletos robóticos portátiles presenta proyecciones de crecimiento altamente optimistas: se espera que su valor pase de USD 2.490 millones en 2025 a USD 30.560 millones en 2032. Durante la última década, este mercado ha mostrado un crecimiento significativo, impulsado por los avances en robótica, la creciente demanda de tecnologías de rehabilitación y un mayor enfoque en la seguridad laboral. Este crecimiento ha sido especialmente marcado en los sectores de salud y manufactura, donde tanto los exoesqueletos pasivos como los motorizados registran una alta demanda.

La pandemia de COVID-19 tuvo un impacto mixto en este sector. Mientras que las aplicaciones en el ámbito de la salud experimentaron un incremento en la demanda, el sector industrial sufrió demoras debido a las interrupciones en las cadenas de suministro. No obstante, la crisis reforzó la necesidad de avanzar en automatización y tecnología, lo que favoreció la recuperación del mercado y sentó las bases para un crecimiento sostenido a largo plazo. Esto último, es lo que se pudo evidenciar en el periodo de pandemia en patentes e investigaciones científicas.

En cuanto a las oportunidades emergentes, los exoesqueletos están siendo cada vez más considerados en entornos industriales para reducir la fatiga laboral, prevenir lesiones y aumentar la productividad, al brindar soporte físico durante tareas repetitivas o que implican levantamiento de cargas pesadas.

Respecto de las principales tendencias de mercado y en el campo tecnológico, se destaca la integración de la inteligencia artificial (IA) y tecnologías de sensores avanzados que permiten mejorar la precisión, funcionalidad y experiencia de uso de los exoesqueletos robóticos portátiles.

Desde la perspectiva geográfica del mercado de exoesqueletos robóticos portátiles, América del Norte lidera el mercado global, representando la región con mayor adopción tecnológica. Por su parte, Asia- Pacifico (APAC) está emergiendo como una de las regiones de más rápido crecimiento en el mercado, impulsadas por la rápida adopción de tecnologías avanzadas en los sectores de salud, manufactura y defensa. Europa constituye el segundo mercado más importante con países como Alemania, Francia y Reino Unido a la vanguardia de la adopción, particularmente en aplicaciones industriales donde las empresas buscan soluciones ergonómicas para mejorar la seguridad y productividad laboral. América Latina, incluyendo Argentina, presenta un crecimiento constante, aunque a ritmo más moderado. El mercado en Medio Oriente y África todavía está en su etapa incipiente, con una adopción limitada en comparación con otras regiones.

#### 3.3.2 Principales competidores

Por último, se mencionan las principales empresas identificadas que lideran el mercado actual internacional de este tipo de dispositivos: Ottobock / Paexo, Lockheed Martin, Cyber Human Systems, Technaid, Innophys, Skelex, Ekso Bionics, Iturri, Bioservo Technologies, ReWalk Robotics, ErgoSanté, Auxivo AG, B-Temia Inc., Bionik Laboratories Corp., Fourier Robotics, Cyberdyne, inc., Exoatlet, Parker Hannifin Corporation, Roam Robotics, Sarcos Corp., Wandercraft y Technaid Sociedad Limitada.

Del listado anterior, solo las siguientes empresas cuentan con solicitudes de patentes relacionadas con exoesqueletos, pero no necesariamente con los tipos de dispositivos que fueron de interés para el presente trabajo de investigación: Ottobock, Innophys, Ekso Bionics, ReWalk Robotics, Auxivo AG, Fourier Intelligence (solo robot exoesqueleto para rehabilitación), Roam Robotics, Exoatlet y Roam Robotics. La única compañía que cuenta con solicitudes de patentes y relacionadas con exoesqueletos robóticos pasivos es Sarcos Corporation, que ya había sido identificada en el apartado del análisis tecnológico.

## 4. CONCLUSIONES

El análisis desarrollado en este trabajo ha permitido comprender de manera más profunda el estado actual y las perspectivas futuras de robótica en los exoesqueletos pasivos de uso industrial a nivel global. A partir de la metodología aplicada, basada en vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva, se ha logrado recopilar y procesar información relevante para delinear tendencias, identificar actores principales y detectar oportunidades emergentes en este campo de la robótica.

En primer lugar, los resultados muestran que, si bien los exoesqueletos en general constituyen una tecnología en expansión, los dispositivos pasivos de uso industrial presentan aún un crecimiento más moderado en comparación con los sistemas activos y en particular relacionados con robótica. Este fenómeno puede atribuirse a limitaciones técnicas, a la relativa novedad del concepto en la industria y a la escasa inversión en proyectos de desarrollo y pruebas a gran escala. No obstante, el crecimiento sostenido de solicitudes de patentes y publicaciones científicas en los últimos diez años indica que existe un interés creciente y consolidado por avanzar en el diseño y optimización de estos dispositivos.

Un hallazgo significativo es la marcada concentración geográfica de los desarrollos en países asiáticos, particularmente en China, que lidera ampliamente en número de patentes, seguido por Estados Unidos y algunas naciones europeas. Sin embargo, esta tendencia no se refleja con igual intensidad en la producción científica, lo que sugiere diferentes estrategias de innovación y protección intelectual entre los países líderes. En Latinoamérica, y específicamente en Argentina, se evidencia una ausencia tanto en patentes como en publicaciones, en términos de robot exoesqueletos pasivos de aplicación industrial, no así, en relación a exoesqueletos pasivos. Pero es importante remarcar, que existen instituciones con capacidades para fortalecer líneas de investigación aplicadas que podrían posicionar a la región en este campo.

Asimismo, se observa que las universidades y centros de investigación son los principales actores en la generación de patentes, lo que denota que el sector empresarial aún no ha alcanzado un nivel de madurez en la comercialización y escalado de estas soluciones. Este escenario abre una ventana de oportunidad para fomentar la cooperación universidad-empresa, impulsando proyectos que integren conocimiento científico, diseño ergonómico, validaciones biomecánicas y estrategias de transferencia tecnológica.

Desde una perspectiva competitiva, el mercado de exoesqueletos pasivos industriales se perfila como un nicho con alto potencial de crecimiento en el corto y mediano plazo. Las proyecciones de expansión del mercado global, junto con la creciente preocupación por la ergonomía, la salud ocupacional y la productividad, impulsarán la demanda de estas soluciones, especialmente en sectores como logística, manufactura y construcción. La integración futura de tecnologías como inteligencia artificial, sensores avanzados y materiales inteligentes permitirá diseñar exoesqueletos más eficientes, ligeros y adaptables a distintos entornos de trabajo.

En síntesis, el presente estudio aporta una base de conocimiento para orientar decisiones estratégicas en investigación, desarrollo e innovación en exoesqueletos robóticos pasivos industriales. La identificación de tendencias tecnológicas, actores clave y vacíos en la producción científica y tecnológica permite proyectar posibles escenarios y acciones prioritarias. Entre ellas se destacan: la necesidad de mayor inversión en investigación aplicada, el fortalecimiento de alianzas entre universidades y empresas, la incorporación de herramientas de simulación y validación ergonómica en el diseño, y la exploración de normativas internacionales que faciliten la adopción de estas tecnologías en entornos laborales.

Finalmente, para Argentina y la región latinoamericana, se abre una oportunidad estratégica para impulsar capacidades en este campo emergente. A partir de la experiencia internacional y el aprovechamiento de metodologías de vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva, es posible diseñar hojas de ruta que favorezcan el desarrollo local de la robótica en exoesqueletos pasivos

industriales, contribuyendo a la mejora de las condiciones laborales, la reducción de lesiones musculoesqueléticas y el incremento de la productividad en industrias clave.

## 5. REFERENCIAS


Agrawal, G., Ardestani, M. M., & Mohebbi, A. (2017). A review of passive and quasi-passive exoskeletons for gait assistance. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 88(2–4), 369–387. https://doi.org/10.1007/s10846-017-0514-1

Al-Khiami, M. I., Lindhard, S. M., & Wandahl, S. (2024). Charting the Exoskeleton Industry: A Comprehensive Insight into Dynamics and Trends. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1389(1), 012014.

Ashton, W. B., & Klavans, R. A. (1997). Keeping abreast of science and technology: Technical intelligence for business. Battelle Press.

Bai, S., Virk, G. S. & Sugar, T. G. (2018). Wearable Exoskeleton Systems: Design, Control and Applications. Institution of Engineering and Technology. ISBN 978-1-78561-302-9.

Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K., & de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance capacity in forward bending work. Applied Ergonomics, 54, 212–217. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.12.004

Collins, S. H., Wiggin, M. B., & Sawicki, G. S. (2015). Reducing the energy cost of human walking using an unpowered exoskeleton. Nature, 522(7555), 212–215. https://doi.org/10.1038/nature14488

De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., & O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application: A review. Ergonomics, 59(5), 589–600. https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988

EduExo Team (2017). EduExo: A Robotics Exoskeleton Kit for STEM Education. Revista Exoskeleton Report, abril-mayo 2017.

IRAM. (2017). IRAM 50520: Sistema de Vigilancia e Inteligencia Estratégica. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).

Kazerooni, H. (2005). Exoskeletons for human performance augmentation. Proceedings of the Human-Robot Interaction Conference, IEEE. https://doi.org/10.1109/HRI.2005.143

Kim, W., Lee, H., Kim, D., Han, J., & Han, C. (2014). Diseño mecánico del robot de asistencia con exoesqueleto Hanyang (HEXAR). 14ª Conferencia Internacional sobre Control, Automatización y Sistemas (ICCAS 2014). https://ieeexplore.ieee.org/document/6988049

Koopman, A. S., Kingma, I., Faber, G. S., de Looze, M. P., & van Dieën, J. H. (2019). Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back in static holding tasks. Journal of Biomechanics, 83, 96–103. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.11.051

Marinov, B. (2015). Types and classifications of exoskeletons. Exoskeleton Report. https://exoskeletonreport.com/2015/08/types-andclassifications-of-exoskeletons/

Miralles, M. T., Oleari, C. V., Florentín, R., & Danieli, J. (2024). Exoesqueletos en la industria: Avances, desafíos y perspectivas futuras. [Nombre de la revista, volumen(número)], pp.–pp. https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/19652ll (completar datos de revista si están disponibles)

tPalop, F., & Vicente, J. M. (1999). Vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva: Su potencial para la empresa española. Fundación COTEC.

Rashedi, E., Kim, S., Nussbaum, M. A., & Agnew, M. J. (2014). Evaluación ergonómica de un dispositivo portátil de asistencia para trabajos por encima de la cabeza. Ergonomía, 57(12), 1864–1874. https://doi.org/10.1080/00140139.2014.952682

Rodríguez Salvador, M., Sbrissa, P., & Chu, T. (2002). La vigilancia tecnológica en la empresa. In-Red: Revista Electrónica de Investigación e Innovación Educativa y Socioeducativa, 1(2).

Sanneman, L., Fourie, C. & Shah, J. A. (2021). The State of Industrial Robotics: Emerging Technologies, Challenges, and Key Research Directions. Foundations and Trends® in Robotics, 8(3), 225–306. https://doi.org/10.1561/2300000065

Toxiri, S., Näf, M. B., Lazzaroni, M., Ortiz, J., Masood, J., Fernández, J., & Caldwell, D. G. (2019). A wearable device for reducing spinal loads during lifting tasks: Biomechanics and user experience. Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application, 46(4), 471–481. https://doi.org/10.1108/IR-01-2019-0009

Van Dijk, W., van der Kooij, H., & Hekman, E. (2017). A passive exoskeleton with artificial tendons: Design and experimental evaluation. Mechanism and Machine Theory, 109, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.11.016

Walsh, C. J., Endo, K., & Herr, H. (2006). A quasi-passive leg exoskeleton for load-carrying augmentation. International Journal of Humanoid Robotics, 4(3), 487–506. https://doi.org/10.1142/S0219843607001027

Young, A. J., & Ferris, D. P. (2017). State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 25(2), 171–182. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2521160

# PENSAMIENTO TRANSFORMACIONAL EQUIVALENTE (ETT)

Nishiyama, Juan Carlos[1]; Marino, Ricardo [1]; Arbore Luciano Nicolás[1]; Omahen Natacha [1]; Carlos E. Requena[1,2]

*[1]Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional General Pacheco (UTN-FRGP)- Departamento de Ingeniería Mecánica, H. Irigoyen 288, Gral. Pacheco, B1617, Partido de Tigre, Prov. de Buenos Aires, Argentina, Tel. +54-11-6017-5991, jcnishiyama@yahoo.com.ar*

*[2]UCA-Pontificia Universidad Católica Argentina, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias. Alicia Moreau de Justo 1500.C1107AAZ, Buenos Aires, Argentina. carloseduardorequena@yahoo.com.ar*

**RESUMEN**

El Pensamiento Transformacional Equivalente, al cual nos referiremos en su sigla en idioma inglés como ETT, es una metodología japonesa para la resolución de problemas ingenieriles. El ETT es prácticamente desconocida en el mundo occidental y permite abordar problemas de manera objetiva, superando la inercia psicológica que limita las estrategias de trabajo a la experiencia propia, restringiendo así nuevas perspectivas. La metodología, consiste en identificar la esencia del problema y su objetivo buscando ejemplos con una estructura equivalente. Luego, se incorporan y transforman las condiciones efectivas de esos modelos para obtener la solución deseada. A diferencia del pensamiento analógico, el ETT, se enfoca en la esencia del problema y no en la similitud superficial, simplificando la información disponible, eliminando datos irrelevantes y destacando el núcleo del problema. Este proceso se puede representar mediante la Ecuación Equivalente en paralelo con un Diagrama de Trabajo ETT, lo que, resume una relación y una transformación equivalente que permiten una mayor eficiencia y flexibilidad en la resolución de problemas. El presente trabajo incluye un ejemplo de nuestra autoría, aplicado para ilustrar el proceso y sus beneficios en el ámbito ingenieril, posicionando a esta metodología como una herramienta de búsqueda de soluciones conceptuales útil para empresas y universidades.

**Palabras Clave:** Resolución de problemas, inercia psicológica, metodología japonesa, transformación equivalente, relación equivalente.

**ABSTRACT**

Equivalent Transformational Thinking, which we will refer to by its acronym ETT, is a Japanese methodology for solving engineering problems. ETT is practically unknown in the Western world and allows for approaching problems objectively, overcoming the psychological inertia that limits work strategies to one's own experience, thus restricting new perspectives. The methodology consists of identifying the essence of the problem and its objective by searching for examples with an equivalent structure. The effective conditions of these models are then incorporated and transformed to obtain the desired solution. Unlike analogical thinking, ETT focuses on the essence of the problem and not on superficial similarities, simplifying available information, eliminating irrelevant data, and highlighting the core of the problem. This process can be represented using the Equivalent Equation in parallel with an ETT Working Diagram, which summarizes a relationship and an equivalent transformation that allow for greater efficiency and flexibility in problem solving. This paper includes an example of our own, applied to illustrate the process and its benefits in the engineering field, positioning this methodology as a useful conceptual solution-finding tool for businesses and universities.

**Keywords:** Problem solving, psychological inertia, Japanese methodology, equivalent transformation, equivalent relationship.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de soluciones de problemas del tipo ingenieril, no basta solo con el conocimiento. Estos se deben emplear articulados con estrategias. Para esa manera de enfrentar a los problemas existen métodos, los cuales se pueden clasificar como:

a) Métodos no Estructurados (Brainstorming, Sinéctica, etc.) [1]

b) Métodos Estructurados. (TRIZ, USIT, SIT, TRIZICS, etc.) [2, 3, 4 y 5]

En el presente el ETT no articularía en esa clasificación, es por eso por lo que los autores del presente trabajo se ven persuadidos de clasificar al ETT como “Método Semiestructurado”. Esta clasificación no es oficial, y que nos surge simplemente como una necesidad de dar ubicación entre los métodos de solución de problemas al ETT. Para las otras las metodologías se citan materiales en referencias.

Enfatizamos que el punto de vista de ETT es muy útil no solo para resolución de problemas, invención de nuevas tecnologías sino también para la educación en las disciplinas de la ciencia, tecnología, ingeniería y matemática (STEM) en el sentido de que profundiza la comprensión de los contenidos que se deben aprender, motiva a los estudiantes a estudiar con mayor profundidad e inspira su creatividad [6].

## 2. EL PENSAMIENTO TRANSFORMACIONAL EQUIVALENTE

### 2.1. Breve historia del ETT

La Teoría del Pensamiento de Transformación Equivalente (ETT) que fue enunciada como principio de creatividad por el Dr. Kikuya Ichikawa (1915-2000, Japón). Se graduó de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Kioto en 1938 y comenzó a trabajar en la creatividad en 1941, mientras era profesor asistente en la Universidad de Kioto. En 1955, tras su investigación y análisis de los descubrimientos e invenciones del pasado. Muchos de los artículos de Ichikawa sobre la creatividad fueron publicados en el Taller de Investigación sobre la Creatividad organizado por el Dr. Hideki Yukawa, ganador del Premio Nobel de Física de 1949. El Dr. Hideki Yukawa llamó a la teoría de Ichikawa "Teoría de la Identificación" y la elogió de forma significativa. Además, describe que el profesor Kikuya Ichikawa de la Universidad de Döshisha ha distinguido dos tipos diferentes de información que él llama "numérica" y "conceptual", respectivamente. Un caso típico de la primera es la procesada por un ordenador electrónico, que consume números y arroja números a cambio. La información que proporciona es "numérica" de principio a fin; en la actualidad, es incapaz de una actividad creativa. Puede manejar información de una complejidad considerable y realizar cálculos difíciles para nosotros, pero no tiene creatividad propia [7]. Desde 1965 hasta 1981, Kikuya Ichikawa, fue profesor en el Instituto de Ciencia e Ingeniería de la Universidad de Doshisha. Desde 1963, ha impartido un curso de larga duración en el Centro de Ciencia y Tecnología de Osaka, "Curso de Desarrollo de la Creatividad en las Empresas" (14 veces desde entonces), y "Seminario de Desarrollo de la Creatividad" (13 veces a partir de entonces) desde 1964. Además, centrándonos en aquellos que han completado estos cursos, se organizó el "Grupo de Estudio para el Desarrollo de la Creatividad", y el nombre se cambió varias veces a partir de entonces, y desde

1985 ha sido la "Sociedad para la Transformación y la Creatividad Equivalentes" que sigue activo. En 2006 se funda el Centro de Desarrollo de la Creatividad de Japón NPO.

### 2.2. Aspectos filosóficos del ETT

La característica que surgió fue que, fuera un descubrimiento o una invención, estaba mediado por el llamado pensamiento analógico [8]. Desde 1944, Ichikawa ha defendido la Teoría de la Analogía y publicó, ese mismo año, "Metodología de la Investigación Creativa", pero no podía entender por qué la analogía, que es esencialmente pensamiento mimético, puede conducir a la creación de nuevos conceptos. Resulta difícil encontrar una solución a este problema. En un momento dado, se defendió la idea de utilizar la analogía hasta cierto punto y luego abandonarla en una determinada etapa, conocida como la “Teoría del Abandono de la Analogía”, pero esto no resultó de gran utilidad.

En su tesis doctoral de 1955, titulada "Un Estudio sobre los Problemas de los Métodos Heurísticos en el Proceso de Investigación de la Ingeniería, Especialmente la Ingeniería Eléctrica", abandonó la teoría de la analogía y adoptó el concepto de "Transformación Equivalente". Estableció una "manera de pensar". Esta idea puede expresarse simplemente como "Pensamiento Creativo". La esencia de algo está determinada por un patrón de pensamiento que procesa conceptualmente uno o ambos objetos

diferentes, introduce una perspectiva apropiada y encuentra tantos aspectos comunes (equivalencias) entre ellos como sea posible.

La Teoría de la Transformación también se ha vuelto más sofisticada y su aplicación práctica ha aumentado, lo mismo que su Diagrama de Flujo de Transformación Equivalente y sus ejemplos son representativos. Su trabajo principal es "Ingeniería Creativa: Introducción de la Teoría de la Creación de Transformación Equivalente al Campo del Desarrollo Tecnológico y sus Resultados" [9].

### 3. Fundamentos del ETT

Esta teoría es un planteo de la lógica fundamental, la cual delinea las bases de cada actividad creativa. Esto implica que el proceso creativo es el resultado de la mezcla de elementos exitosos de varios eventos históricos y combinados, ellos con condiciones del presente para formar un progreso rápido y único en el futuro.

La definición de la Teoría de Transformación Equivalente sería: "Suponiendo que A es cualquier evento con antecedentes históricos, configuramos un punto de vista adecuado (υi) sobre A. Abstraemos los constituyentes (c.Ɛ) los cuales deberían ser transformados desde el pasado hacia el futuro desde A, al dividir A y eliminar las condiciones específica Σa en el sistema de inicio. Luego combinamos estos constituyentes con las condiciones históricas Σb en el sistema final y transformar y reconstruir el sistema de inicio A en la nueva realidad B".

Es interesante que esta teoría es similar al modismo japonés “Onko chishin” significa “aprender del pasado” o “comprender el pasado para descubrir lo nuevo” [10]. Es una forma de pensar que anima a las personas a estudiar y reflexionar sobre sus experiencias y conocimientos para obtener nuevos conocimientos.

Cualquier sistema actual es el resultado de la evolución a través de los sistemas anteriores y la evolución no se puede detener. Sin contar que, la creatividad no puede ser totalmente excluida del proceso de la evolución humana. La evolución avanza principalmente a través de una sucesión de ensayos y errores con un extraño equilibrio entre los resultados positivos y negativos. La sociedad humana paga un precio enorme para los efectos secundarios de este tipo de evolución de prueba-y-error: millones de personas muertas o con discapacidad, y millones sufren de hambre o de enfermedades dolorosas y mortales [2].

Este concepto (continuando con Shozo Hibino) está profundamente arraigado en la cultura japonesa y se puede analizar en la forma en que operan las empresas japonesas. A menudo miran al pasado en busca de ejemplos y hechos que las ayuden como punto de partida a entender hacia donde ir.

El Dr. Toru Nakagawa de la universidad de Osaka, Japón, presidente del TRIZ Japan, representó la ecuación ETT (en un diagrama más fácil de entender en el sentido), como se muestra en la adaptación al castellano por los autores en la Figura 1 [11].

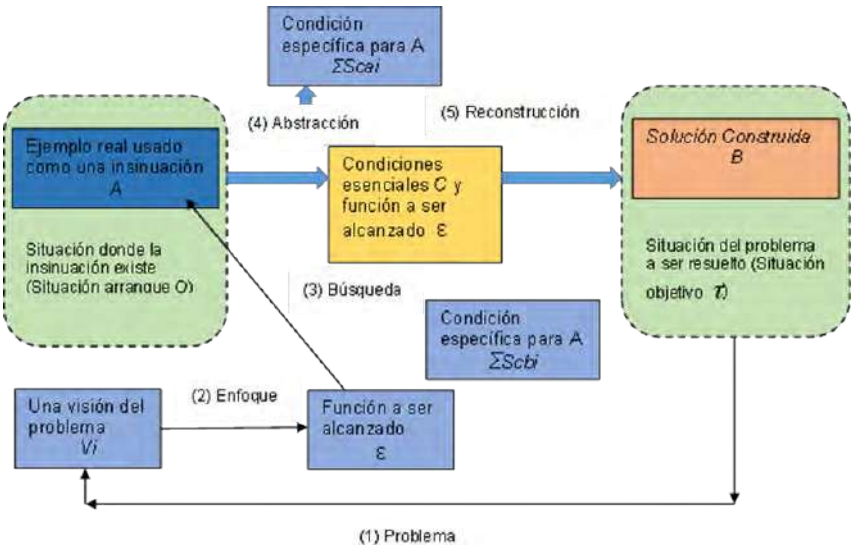



*Figura 1. Explicación según el Dr. Toru Nakagawa (traducida al castellano por los autores).*

Este diagrama de ETT describe principalmente la información que se utilizará; por lo que es una especie

de "diagrama de flujo de datos" (en lugar de un diagrama de flujo, o un "diagrama de proceso de flujo"'). El método de procesamiento se muestra con flechas y numeraciones, en referencia con el diagrama de flujo ETT de Ichikawa. Se muestra un resumen de los pasos fundamentales del proceso:

1. Identificar el problema/alcance/objetivos.

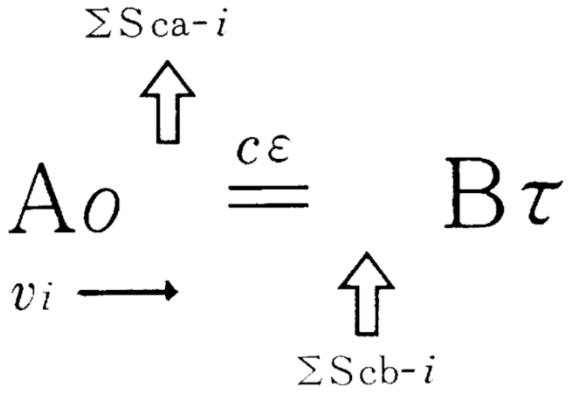
2. Definir punto de vista que puede resolver el problema y resumen de la esencia (vi, Ɛ).

3. Buscar un ejemplo inicial que contenga la esencia (A0).

4. Establecer nuevo modelo conceptual, identificar como la indirecta satisfacer la esencia explicando con qué estado. (c.Ɛ)

5. Completar la idea del producto realizando nuevo modelo conceptual. (Σa, + Σb, Bτ)

Ahora podemos expresar esta teoría por la siguiente ecuación equivalente. Ver Figura 2.




***Dónde:***
***0***: es una línea donde el evento **A** ocupa (línea de origen o línea de comienzo)
***τ***: es una línea donde el evento **B** ocupa (línea transformada o línea de destino).
$\mathbf{A_0}$: es el evento en el cual aparece en la línea original.
$\mathbf{B_\tau}$: es el evento en el cual aparece la línea transformada ***τ*** o el evento el cual fue reconstruido sobre la línea ***c.Ɛ***.
***Ɛ***: es una dimensión equivalente la cual es capaz para combinar ambos lados de la ecuación por un signo igual.
***c***: son las condiciones las cuales definen concretamente la dimensión equivalente anterior (usualmente $\mathbf{\Sigma c_i}$ en forma plural).
**ΣSca-*i***: son las condiciones específicas de la línea de comienzo (línea ***0***).
**ΣScb-*i***: son las condiciones específicas de la línea de destino (línea ***τ***).
$\boldsymbol{v_i}$: es uno de algunos de los puntos de vista.
→: es la dirección de pensamiento.

*Figura 2. Adaptación de la fórmula del patrón de innovación del ETT [10].*

Hay dos casos en esta ecuación equivalente, es decir:

a) Cuando ambos, $A_0$, $B_\tau$ son conocidos, decimos que podríamos encontrar la relación equivalente si estableciéramos la ecuación anterior por introducción de una propiedad c.Ɛ.

b) Cuando A es conocido, decimos que podemos transformar

equivalentemente desde $A_0$ hacia $B_\tau$ reconstruimos este sobre la línea τ por encontrar c.Ɛ con un apropiado punto de vista y adicionando las nuevas condiciones.

Desde el punto de vista de la Ingeniería Creativa y de la Ingeniería de Diseño, el caso anterior (b) es bastante importante. Para desarrollar el proceso de Ingeniería Creativa, permítanos explicar esta ecuación equivalente paso a paso.

1) Encontrar o plantear los problemas o necesidades: Como dice el proverbio de oro, "la necesidad es la madre de la invención". Hay fuertes necesidades o problemas importantes que resolver en nuestra sociedad antes de que ocurra una invención o innovación y las soluciones a estas necesidades o problemas están a menudo latentes debido a nuestros conceptos fijos. Deberíamos mirar el mundo existente, es decir el medioambiente que nos circunda y localizar e identificar los diversos problemas o necesidades que existen y seleccionar prioritariamente uno de ellos.

2) Determinar el punto de vista υí: Extraer los factores importantes los cuales constituyen el problema determinado o necesidad. Se debe seleccionar el factor más esencial desde los factores importantes del grupo Σfi. Este es el factor más esencial que hace a nuestro punto de vista υí.

3) Determinar la función esencial o estructura Ɛ: Verbalizando y estructuralizando el punto de vista ví, podemos determinar la función esencial o estructura Ɛ. Este Ɛ es llamado "Tentáculo de búsqueda" lo cual significa que utilizamos esto como nuestra guía para buscar los sistemas de inicio con el mismo Ɛ.

4) Buscar por el sistema de inicio $\Sigma A_{0\text{-}i}$: Usando la búsqueda de tentáculos Ɛ como muestra nuestra guía, colectamos un grupo de sistemas de inicio $\Sigma A_{0\text{-}i}$. Este $\Sigma A_{0\text{-}i}$ es llamado un "Librería $A_0$ ", la cual, es usualmente, nuestra reserva de conocimiento .

5) Determinar el mejor sistema de inicio desde $\Sigma A_{0\text{-}i}$: Chequeamos cada librería $A_0$ con Ɛ y seleccionamos el sistema más adecuado desde la librería A0. Este A0 debería incluir la función esencial o estructura y con la expectativa de que la estructura esencial sea cerrada para el patrón primitivo.

6) Confirmar el esqueleto de $A_0$: Sacando las condiciones específicas Σa, las cuales son solamente utilizadas en el sistema de inicio desde $A_0$, podemos confirmar el esqueleto de $A_0$ el cual es c.Ɛ. Este c determina Ɛ más concretamente. Este c.Ɛ es expresado verbalmente o a veces ilustrado por un simple dibujo. Este c.Ɛ es también llamado “el concepto básico” del sistema completado.

7) Combinar c.Ɛ con las condiciones específicas Σb sobre la línea τ : Intentar combinar c.Ɛ con las condiciones específicas en mente sobre la línea τ. Estas condiciones específicas son conocimiento técnico profesional e información detallada. Después de imaginar varias combinaciones de prueba podemos luego construir un modelo piloto experimental.

8) Examinar los logros del objetivo: Examinamos el modelo piloto y determinar qué grado puede alcanzar nuestro primer objetivo. Sino podemos alcanzar nuestro primer objetivo, debemos luego retornar a la etapa (2) o a la etapa (4) y se debería chequear nuevamente $A_0$ y repetir las etapas sucesivas . Podemos repetir este proceso hasta que encontramos el sistema.

La Figura 3 muestra el flujo de estas etapas. Este diagrama de flujo es llamado “Diagrama de Flujo de Pensamiento ETT” y es muy efectivo para actividades creativas.

## 4. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL PENSAMIENTO TRANSFORMACIONAL EQUIVALENTE

### 4.1. Problema de la Formación de Espuma en Líquidos

Durante el llenado de envases con detergente, surge el inconveniente de una excesiva formación de espuma, dado que el detergente tiene gran cantidad de agua en su formulación, debido a que el cliente solicita un detergente de bajo costo. Esa excesiva espuma, hace que, al introducir el detergente, este forme espuma y al alcanzar la mitad del volumen, esto es la mitad de altura del envase, la espuma ya esté a la altura del pico. El problema resulta de tener que esperar largo tiempo hasta que la espuma desaparezca y así, seguir llenando el envase hasta alcanzar el volumen deseado. Ver Figura 4.

Los fenómenos que están en juego en la “vida” de una espuma se pueden dividir en tres etapas, las cuales se han definido como:

- La formación de la espuma (de algunos segundos hasta algunos minutos).
- La maduración de la espuma desde la espuma húmeda a la espuma seca donde el espesor de la película es todavía grande respecto a la escala coloidal (de algunos minutos a algunas horas).
- La persistencia de las espumas secas cuya estabilidad de la película depende de las interacciones coloidales (de varias horas a varios días dependiendo del caso).

¿Qué hacer?

*SOLUCION A:* Llenar el envase hasta rebalsar el total de la espuma.

INCONVENIENTE: Se ensucia el exterior del envase, manchando la etiqueta, o si no, si esta es de pegado posterior, hay que agregar la operación de limpieza y proceder al pegado posterior. Una solución a esto sería en invertir dinero en una etiquetadora que evite el etiquetado por adhesividad, esto es, que sea rodeando el envase.

*SOLUCION B:* invertir en un cambio del sistema de llenado, en el cual el detergente, no se dosifique violentamente al interior del envase agitándose y formando espuma.

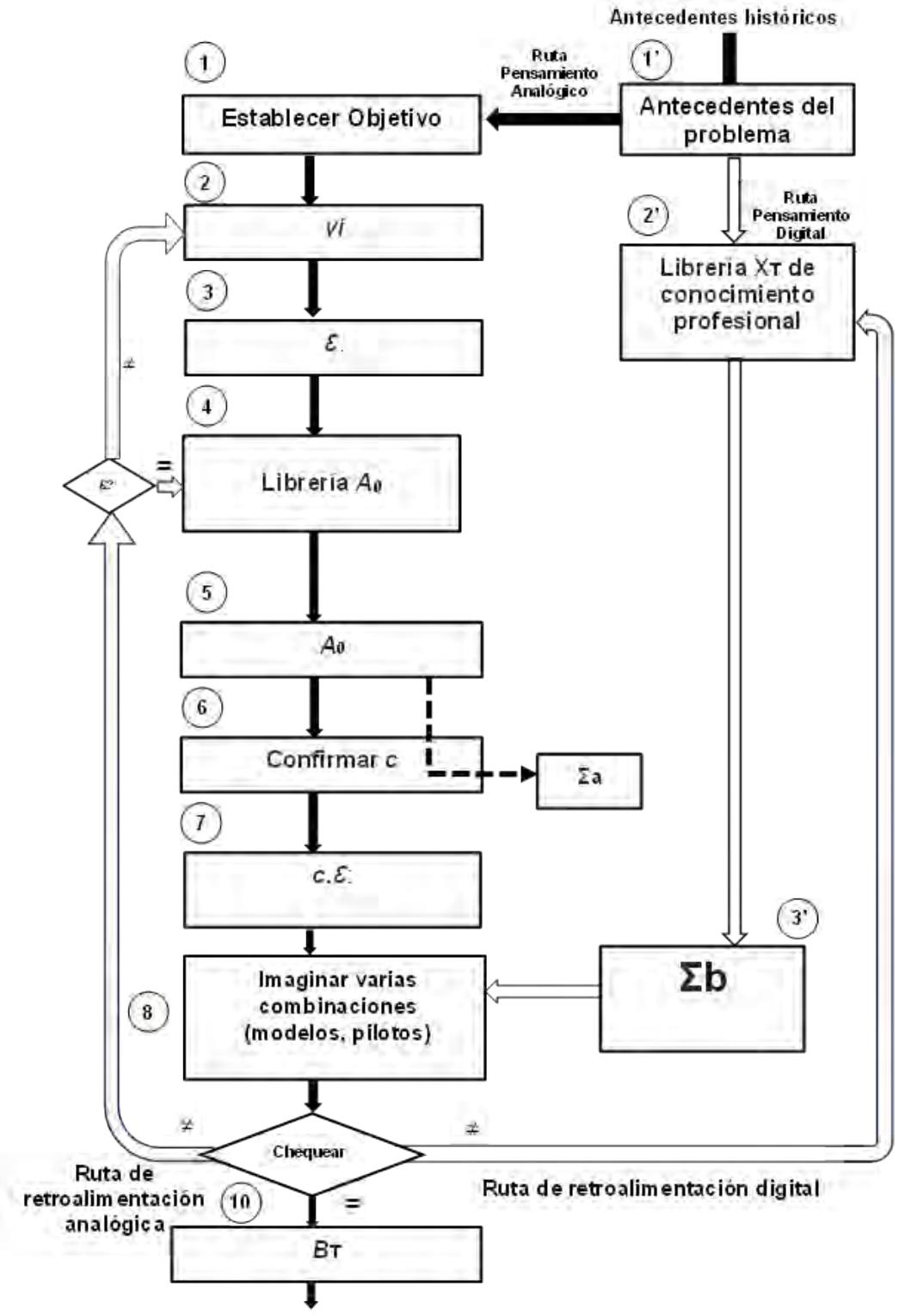



*Figura 3. Diagrama de Flujo del Pensamiento Transformacional Equivalente Simplificado.*

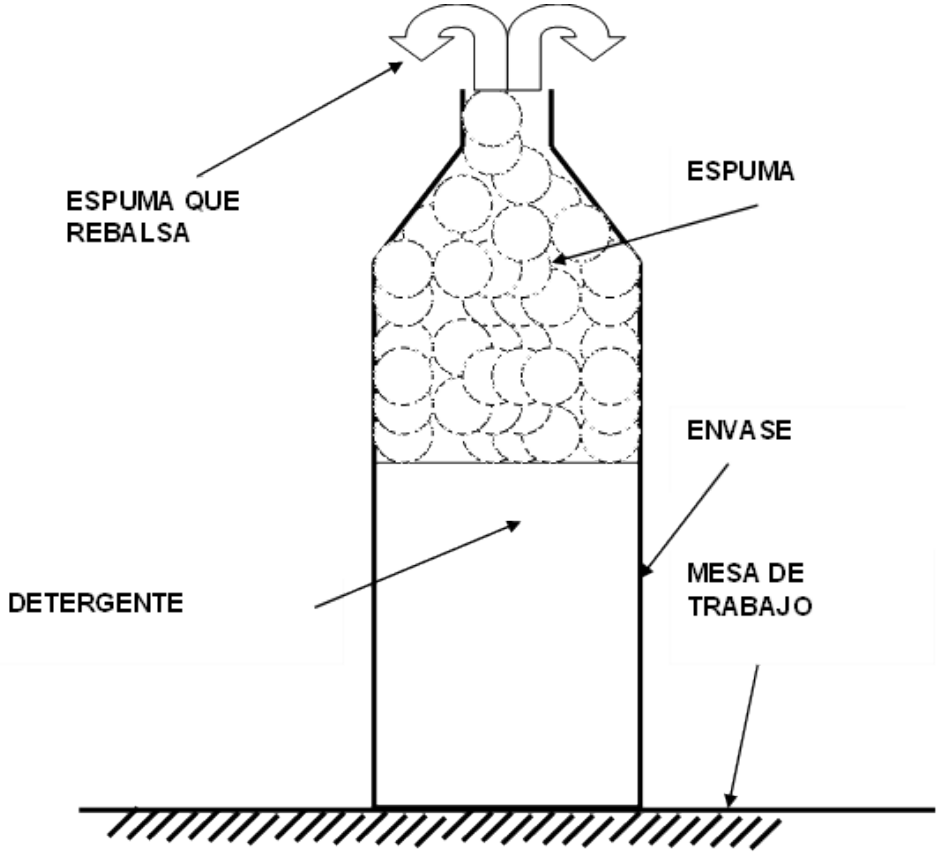



*Figura 4. Detalle gráfico de cómo se formó espuma el envase al ser llenado con detergente.*

INCONVENIENTE: Se hace necesario una inversión de dinero, y no se cuenta con ello.

*SOLUCION C:* Cambiar el diseño del envase, hacerlo más bajo.

INCONVENIENTE: El diseño en uso es estándar y barato y hay gran acopio en depósito.

*SOLUCION D:* Aplicar ultrasonido, donde tal vez se rompan las burbujas de la espuma.

INCONVENIENTE: Nuevamente exige inversión en equipamiento y habría que hacer ensayos para comprobar la efectividad y luego llevar a scaling up, etc.

*SOLUCION E:* Rechazar el pedido, el desafío.

INCONVENIENTE: Demuestra incapacidad ante las exigencias del cliente, perder su confianza y no dar una buena imagen ante otros clientes y de potenciales clientes.

Las estrategias de soluciones halladas exigen procedimientos, probablemente buenos, pero costosos y de difícil implementación.

¿Qué hacer?

La solución ideal, en donde su aplicación sea perfecta, sin costo y que no exista, es el ideal anhelado. Ver Figura 5.

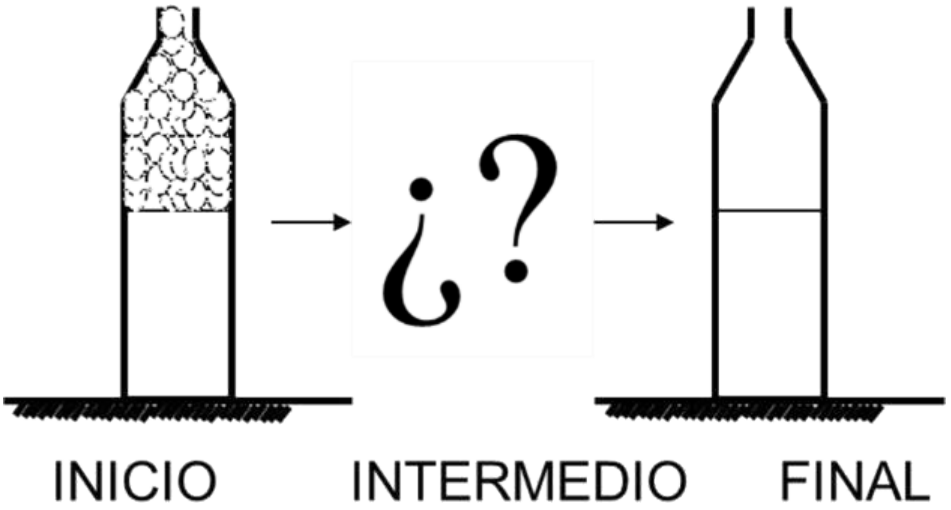



*Figura 5. ¿Cómo saber que hacer en ese INTERMEDIO?*

Una de las estrategias, hasta el momento, es hacer uso de metodologías semi estructuradas o estructuradas de resolución de problemas. Aquí emplearemos el ETT.

Como se ve hay que pinchar las burbujas que son pequeñas y muchas y hacerlo rápido. Veamos el planteo en la ecuación ETT de la Figura 6.




*Figura 6. Ecuación ETT para el caso del problema de acumulación de espuma.*

Entre esta ecuación y/o el acompañamiento de Diagrama de Flujo del ETT de la Figura 7 podemos ir delineando una forma definitiva a la solución.

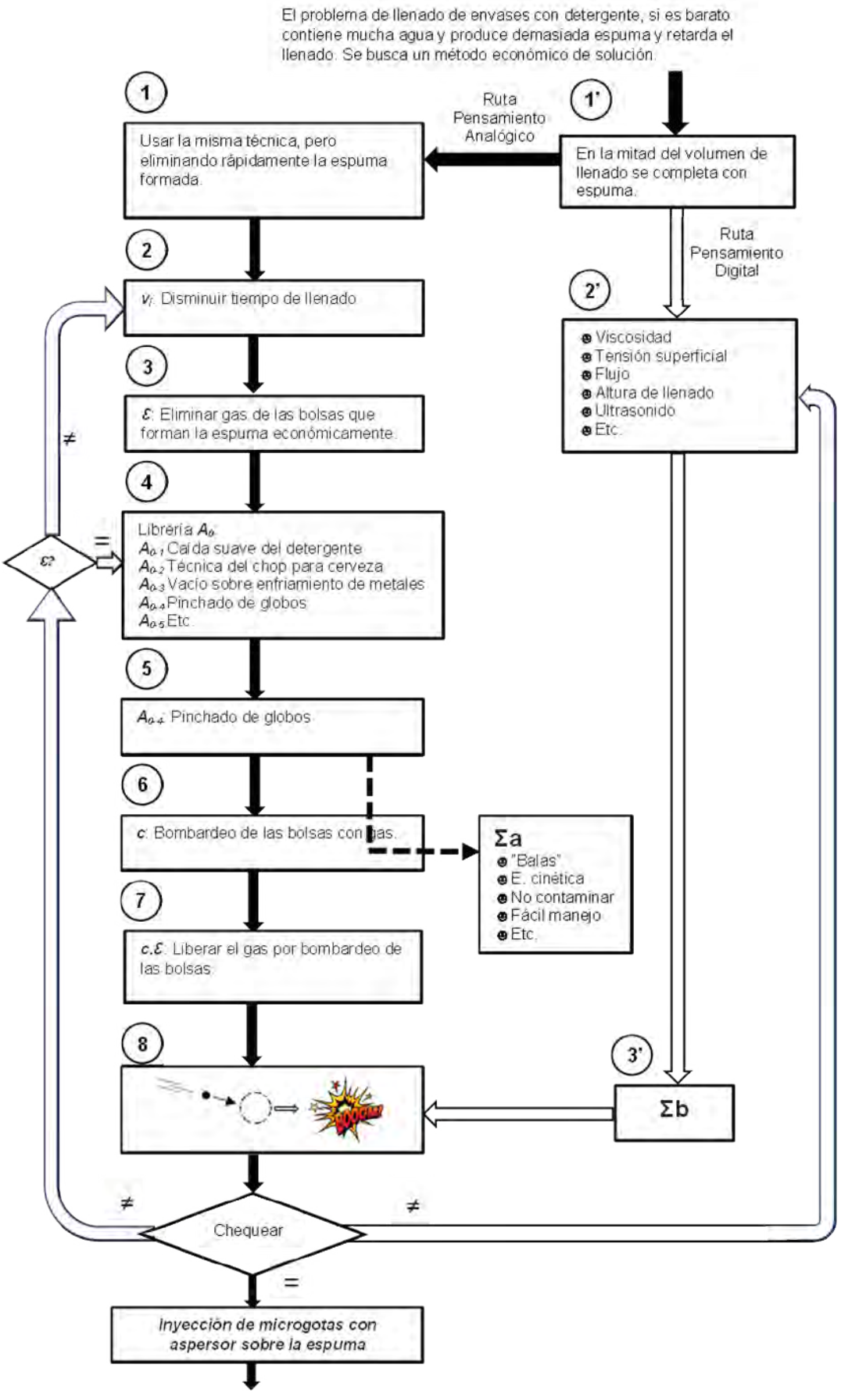



*Figura 7. Diagrama de Flujo del ETT para el caso de la espuma.*

¿Cómo deben ser esas microgotas?: No deben interferir químicamente con el líquido, entonces debe ser el mismo líquido (concepto de mundo cerrado).

¿Y cómo las fabrico?: Con respecto a esto hay un problema, la viscosidad del detergente. Hacer pequeñas partículas con viscosidad del líquido elevada es difícil. La idea de solución viene de la mano de la función de un atomizador manual o automatizado. Ver Figura 8.



*Figura 8. Esquema de un atomizador.*

Sea manualmente o por atomizador automatizado, la idea sale por utilizar agua que parte de la composición de la formulación del detergente. Quizás se le pueda añadir algún otro componente que no altere la composición.

Así, el concepto de solución es alcanzado. Quizás el lector pudo haber llegado a otras soluciones conceptuales, nosotros solo presentamos está a modo de ejemplo, pero seguramente no es la única.

## 5. CONCLUSIONES

La necesidad de presentar esta metodología de resolución de problemas se debe a que, prácticamente no se conoce en el mundo occidental. Sí es conocida en Japón, y otros países de Asia.

En nuestra búsqueda hemos encontrado que la mayoría de los trabajos en que se empleaba el método creado por Kikuya Ichikawa se reducía a trabajos del propio autor y de autores de otro países asiáticos. Esto particularmente nos resultó extraño dado que se trata de una herramienta de pensamiento muy interesante, sumamente práctica y útil. Hemos analizado trabajos de aplicación de profesionales de Hitachi, Pioneer, Kindai University in Japan, Instituto de Investigación Mitsubishi, MRI Systems, Toyota, entre otros.

El objetivo final, no solo es ubicar al lector en conocer, aprender y aplicar ETT, sino también en como encuadrar la muy útil metodología como “herramienta de bolsillo”, prácticamente desconocida en occidente con otras metodologías estructuradas, previamente mencionadas y que, poco a poco, se están difundiendo en algunos países más que en otros desde las empresas y universidades.

En Argentina, en el año 2015, los autores comienzan a enseñar ETT y Metodologías Estructuradas en la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional General Pacheco (UTN FRGP) dentro de la asignatura electiva denominada “Metodologías para el Desarrollo de la Creatividad en Ingeniería” perteneciente a 3er año de la carrera de Ingeniería Mecánica.

Nuestro deseo es compartir este breve conocimiento de las escasas fuentes de información sobre ETT, con la esperanza de que esta labor sirva a los futuros adeptos que quieran trabajar este método y lo enriquezcan con sus propios aportes.

## 6. REFERENCIAS


[1] Carranza, Erick Grudner; Ticona, Pablo Castelú. Creatividad, Inventiva e Innovación Tecnológica. Revista Tecnológica, AÑO 12 Vol. 10 Nº 16. Instituto de Investigaciones y Aplicaciones Tecnológicas IIAT, Edificio Facultad de Tecnología. Bolivia. 2014

[2] Bukhman, I. TRIZ Technology for Innovation. Published by Cubic Creativity Company. ISBN 978-986-85635—2-0. 2012. Traducción al español para uso personal por: J. C. Nishiyama, T. Zagorodnova y C. Requena. 2015.

[3] Sickafus, E., “Unified Structured Inventive Thinking – How to Invent”, Ntelleck, LLC, Grosse Ile, MI, USA, ISBN 0-965-94350-X. (www.u-sit.net). 1995

[4] Horowitz, Roni. (2001). 'From TRIZ to ASIT in 4 Steps', Nakagawa Toru. TRIZ Home Page in Japan. Universidad de Osaka. 2003. http://www.start2think.com

[5] Cameron, Gordon - TRIZICS: Teach yourself TRIZ, how to invent, innovate and solve "impossible" technical problems systematically. www.trizics.com. 2010. ISBN 1456319892

[6] ICBAKE, 2023: ICBAKE2023 (fit.ac.jp)

[7] Yukawa, Hideki. Creativity and Intuition, a Physicist Looks at East and West. First published May 1, 1973.

[8] Matsuki, Akira, Director Representante de la Sociedad de Creación de Transformación Equivalente, Japón. 2016

[9] Nakagawa, Toru. Prefacio del editor (25 de septiembre de 2001)

https://www.osakagu.ac.jp/php/nakagawa/TRIZ/jpapers/Ichikawa010918/IchikawaET010918.html

[10] Hibino, Shozo. Theory of Equivalent Transformation and Total Creative Systems Design Strategy. 1979

[11] Nakagawa, Toru (Osaka Gakuin University, Japan). A New Paradigm for Creative Problem Solving: Six-Box Scheme in USIT without Depending on Analogical Thinking. English Translation by Toru Nakagawa, Apr.

# METODOLOGÍAS ESTRUCTURADAS DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS PARA LA INGENIERÍA

Nishiyama, Juan Carlos[1]; Marino, Ricardo [1]; Arbore Luciano Nicolás[1]; Omahen Natacha [1]; Carlos E. Requena[1,2]

*[1]Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional General Pacheco (UTN-FRGP)- Departamento de Ingeniería Mecánica, H. Irigoyen 288, Gral . Pacheco, B1617, Partido de Tigre, Prov. de Buenos Aires, Argentina, Tel. +54-11-6017-5991, jcnishiyama@yahoo.com.ar*

*[2]UCA-Pontificia Universidad Católica Argentina, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias. Alicia Moreau de Justo 1500.C1107AAZ, Buenos Aires, Argentina. carloseduardorequena@yahoo.com.ar*

**RESUMEN**

Se hará un breve recorrido por distintas metodologías estructuradas para la resolución de problemas de ingeniería, bastante desconocidas en Argentina. Se menciona y se comparan algunas metodologías como Ensayo y Error, Brainstorming y Pensamiento Lateral, las cuales se denominan, en comparación a las que se abordarán, como no estructuradas, ampliamente conocidas y difundidas. El enfoque principal del trabajo estará en la metodología estructurada conocida como TRIZ, de la cuál, se derivan en forma directa e indirecta otras metodologías estructuradas como SIT, ASIT, USIT, HI, TRIZICS, 121 H, Soluciones Paramétricas. De estas solo abordaremos algunas.

Para ampliar el espectro de metodologías, se realizará una breve mención al Pensamiento Transformacional Equivalente (ETT), de origen japonés, la cual, estos autores la clasifican como una metodología semiestructurada, aún más desconocida que las mencionadas estructuradas.

El objetivo de este trabajo es ofrecer una visión general de estas metodologías, principalmente, de las estructuradas resaltando sus diferencias y aplicaciones en el ámbito de la ingeniería, y proporcionando una orientación básica para su implementación en la práctica profesional, alcanzando no la solución de un problema, sino converger en un espacio de soluciones innovadoras y efectivas.

**Palabras Clave:** Resolución de problemas, Inercia psicológica, Metodología japonesa, Transformación equivalente, Relación equivalente.

**ABSTRACT**

A brief overview will be provided of various structured methodologies for solving engineering problems, which are relatively unknown in Argentina. Methodologies such as Trial and Error, Brainstorming, and Lateral Thinking are mentioned and compared. These methodologies, compared to the ones discussed below, are considered unstructured, widely known, and widespread. The focus of this paper will be on the structured methodology known as TRIZ, from which other structured methodologies such as SIT, ASIT, USIT, HI, TRIZICS, 121H, and Parametric Solutions are directly and indirectly derived. Of these, only a few will be addressed.

To broaden the range of methodologies, a brief mention will be made of Equivalent Transformational Thinking (ETT), of Japanese origin, which these authors classify as a semi-structured methodology, even less well-known than the structured methods.

The objective of this paper is to offer an overview of these methodologies, primarily the structured ones, highlighting their differences and applications in the field of engineering and providing basic guidance for their implementation in professional practice. This approach not only achieves a solution to a problem, but rather converges toward a space of innovative and effective solutions.

**Keyword:** Problem solving, psychological inertia, Japanese methodology, Equivalent transformation, equivalent relationship.

## 1. INTRODUCCIÓN

Como se mencionó, las metodologías de resolución de problemas de tipo ingeniería se pueden clasificar en los siguientes términos:

- No Estructuradas
- Semiestructuradas
- Estructuradas

Salvo el 1er y el 3er punto son tradicional y justificadamente nombrados así en base a las Metodologías Estructuradas que describiremos. Particularmente, nos vimos inducidos a incluir el término Semiestructurado, como una necesidad de enmarcar Pensamiento Transformacional Equivalente de Ichikawa (ETT) .

Las metodologías no estructuradas son métodos didácticos para estimular la creatividad. Corresponden a ejercicios de entrenamiento organizados grupalmente, que involucran provocaciones, estímulos y motivaciones lúdicas para lograr determinado objetivo, sustituyendo de alguna manera las estructuras del pensamiento lógico por estructuras espontáneas del pensamiento divergente. Las estrategias de estas metodologías, por ejemplo, Brainstorming, Sinéctica, Prueba y Error, y unas 40 más [1], en general, abordan los problemas como muestra la Figura 1.

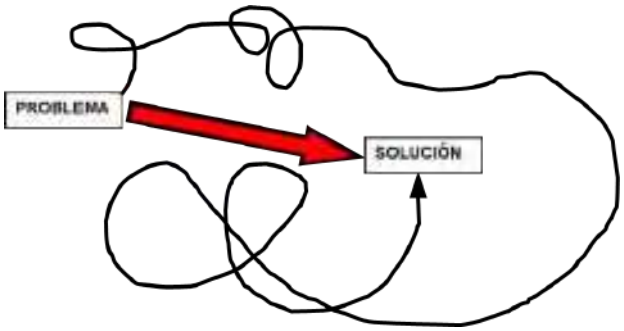



*Figura 1: Ejemplo aproximado de como trabajan las metodologías no estructuradas.*

La solución al problema particular puede ser alcanzada muy rápidamente, situación que es muy poco probable, o lo más probable es que el camino hacia la solución tenga una componente de naturaleza muy azarosa, difícilmente reproducible. Estos métodos tienen una fuerte componente de inercia psicológica, es decir, resistencia al pensamiento creativo libre debido a las barreras impuestas inconscientemente, es un cierto "estancamiento" debido a una programación humana, a guiarse por sus hábitos, como ya describimos. La inercia psicológica representa las muchas barreras a la creatividad personal y a la capacidad de resolución de problemas [2]. La inercia psicológica es completamente evitable en el ETT y en TRIZ y metodologías derivadas de esta.

## 2. PENSAMIENTO TRANSFORMACIONAL EQUIVALENTE

### 2.1. Breve historia del ETT

El Pensamiento Transformacional Equivalente es una teoría acerca de la creación y la innovación creada por el Dr. Kikuya Ichikawa (Kyoto University y se trasladó a Doshisya University) en 1955. Es practicado y probado por la Escuela de Ichikawa que fueron los ingenieros profesionales de los sectores de I + D y de producción de los sectores de manufacturas. El Dr. Ichikawa dirigió la escuela desde los años 60 a los 80 del siglo pasado. Es estudiado de forma continua en las reuniones académicas formada por estudiantes de las escuelas Ichikawas [3].

### 2.2 Bases del ETT

Kikuya Ichikawa (1915-2000, Japón) trató de superar la debilidad del pensamiento analógico y establecer un nuevo esquema para la solución creativa de problemas. Se representó a su aplicación en forma de ecuación matemática (ecuación ETT), como se muestra en la Figura 2.

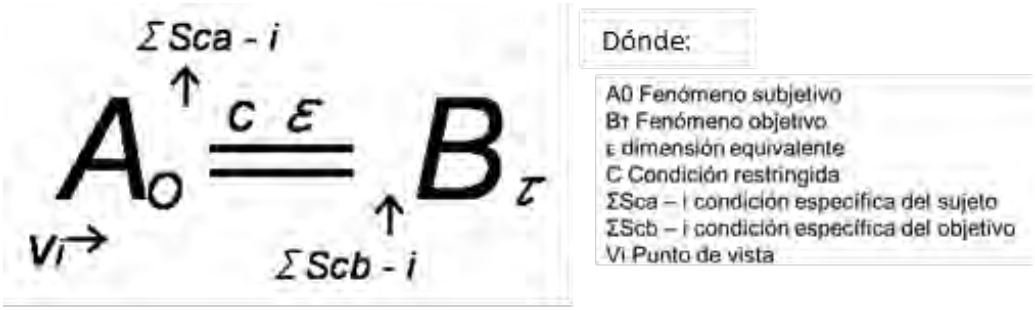



*Figura 2. Ecuación del ETT. [4]*

### 2.3. Breve aplicación del ETT

El Teredo es un gusano marítimo capaz de perforar la madera reblandecida de los barcos y a su vez deja una envoltura protectora dentro del túnel. Esto último proporciona rigidez al hoyo, protegiendo al gusano de un posible aplastamiento. La Tuneladora es un dispositivo, ideado por el británico Marc Brunel se basó en el comportamiento del Teredo. A medida que la máquina va excavando, detrás de ella se va montando una estructura que estabiliza las paredes del túnel y evita que se derrumbe. Ver Figura 3. [5]

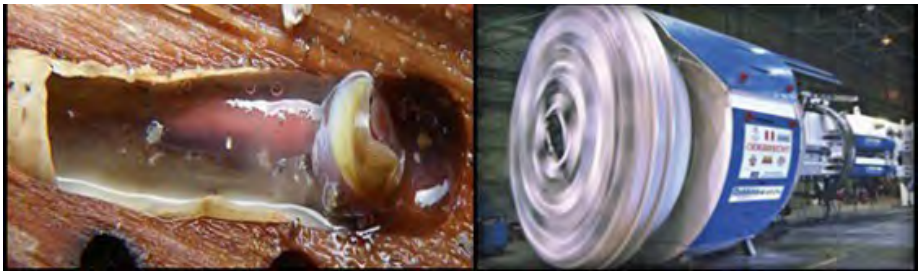


*Figura 3. Gusano Teredo a la izquierda y tuneladora a la derecha*

En representación de la ecuación quedaría como lo muestra la Figura 4.




*Figura 4. Ecuación ET del caso de la tuneladora.*

## 3. TRIZ

### 3.1. Breve historia de TRIZ

El creador del método TRIZ (acrónimo ruso de: Teoría de Resolución de Problemas de Inventiva) fue Genrich Altshuller [6], ingeniero ruso que desarrolló la teoría a través del análisis de ciento de miles de patentes de invención. Se percató de que a pesar de que los inventos que analizó resolvían problemas muy diferentes, en campos también muy diferentes, las soluciones aplicadas podían obtenerse a partir de un conjunto relativamente reducido de ideas básicas o principios de invención generales.

### 3.2. Filosofía TRIZ

En la década de 1950, Altshuller escribió que, encontrar y resolver las contradicciones es esencial en la resolución de problemas. Durante las últimas décadas, las mismas contradicciones se han descubierto en situaciones de la ciencia, la ingeniería y empresariales que, en la superficie, parecen ser muy diferentes entre sí.

### 3.3. Herramientas Clásicas de TRIZ

Del estudio realizado por Altshuller y su equipo, surgió que los parámetros de ingeniería en juego en todas las soluciones de los problemas halladas en las patentes eran tan solo 39 [7]. Estos se conocen como Los "39 Parámetros de Ingeniería". También, del mismo estudio, surgieron solo 40 principios de invención conocida como los "40 Principios de Inventiva". Ver Tabla 1 y Tabla 2.

*Tabla 1. Lista de los 39 Parámetros de Ingeniería utilizados en TRIZ*

| LOS 39 PARÁMETROS DE INGENIERÍA | | | |
|---|---|---|---|
| 1. Peso de un objeto móvil<br>2. Peso de un objeto inmóvil<br>3. Longitud de un objeto móvil<br>4. Longitud de un objeto inmóvil<br>5. Área de un objeto móvil<br>6. Área de objeto inmóvil<br>7. Volumen de objeto móvil<br>8. Volumen de objeto inmóvil<br>9. Velocidad | 10. Fuerza<br>11. Tensión, presión,<br>12. Forma<br>13. Estabilidad de un objeto<br>14. Fuerza<br>15. Durabilidad de un objeto móvil<br>16. Durabilidad de un objeto inmóvil<br>17. Temperatura<br>18. Brillo<br>19. Energía consumida por un objeto móvil | 20. Energía consumida por un objeto inmóvil<br>21. Potencia<br>22. Desperdicio de energía<br>23. Desperdicio de sustancia<br>24. Pérdida de información<br>25. Perdida de tiempo<br>26. Cantidad de sustancia<br>27. Fiabilidad<br>28. Precisión de medida<br>29. Precisión de manufactura | 30. Factores nocivos que actúan en un objeto<br>31. Efectos nocivos<br>32. Manufacturabilidad<br>33. Conveniencia de uso<br>34. Reparabilidad<br>35. Adaptabilidad<br>36. Complejidad de un dispositivo<br>37. Complejidad de control<br>38. Nivel de automatización<br>39. Productividad |

*Tabla 2. Tabla donde se muestran los 40 principios de solución utilizados en TRIZ.*

| LOS 40 PRINCIPIOS INVENTIVOS | | | |
|---|---|---|---|
| 1. Segmentación<br>2. Extracción<br>3. Calidad local<br>4. Asimetría<br>5. Combinación<br>6. Universalidad<br>7. Anidación<br>8. Contrapeso<br>9. Reacción previa<br>10. Acción previa<br>11. Amortiguamiento anticipado<br>12. Equipotencialidad | 13. Inversión.<br>14. Esferoidalidad<br>15. Dinamicidad<br>16. Acción parcial o sobrepasada<br>17. Moviéndose a una nueva dimensión<br>18. Vibración mecánica<br>19. Acción periódica<br>20. Continuidad de una acción útil<br>21. Despachar rápidamente<br>22. Convertir algo malo en un beneficio | 23. Retroalimentación<br>24. Mediador<br>25. Autoservicio<br>26. Copiado<br>27. Objeto barato de vida corta en vez de uno caro y durable<br>28. Reemplazo de sistemas mecánicos<br>29. Uso de una construcción neumática o hidráulica<br>30. Película flexible o membranas delgadas | 31. Uso de material poroso<br>32. Cambio de color<br>33. Homogeneidad<br>34. Restauración y regeneración de partes<br>35. Transformación de los estados físicos y químicos de un objeto<br>36. Transición de fase<br>37. Expansión térmica<br>38. Uso de oxidantes fuertes<br>39. Medio ambiente inerte<br>40. Materiales compuestos |

### 3.4. Contradicción Técnica en TRIZ

Una contradicción técnica es una situación en la que queremos variar una característica (parámetro de ingeniería) de un sistema tecnológico y al hacerlo nos varía otra que no queremos que se modifique o que, en todo caso, se podría modificar en sentido contrario al que lo hace. Veamos algunos ejemplos:

***Ejemplo 1:*** Si reduzco costos reduciendo el tensioactivo de un detergente por dilución, voy en detrimento de su viscosidad.

***Ejemplo 2:*** Si en una pieza de chapistería deseo reducir su peso, debo reducir el espesor, en detrimento de su resistencia mecánica.

Estas dos tablas anteriores permiten crear una matriz denominada Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas (Figura 5) que nos permitirá resolver las contradicciones técnicas en una situación tecnológica problemática. Para ello se requiere de la abstracción del sistema, luego la identificación de la contradicción técnica, seguidamente la aplicación del operador abstracto o principio, y por último la especificación para obtener de nuevo el sistema físico con el problema resuelto.

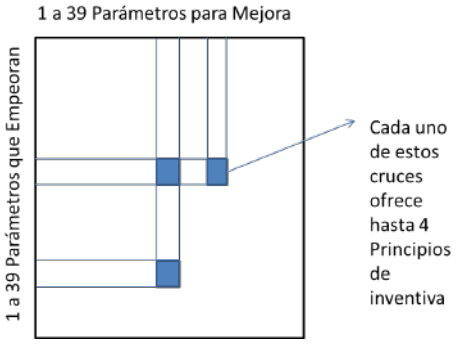



*Figura 5. Esquema de la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas.*

En el cruce de cada fila y columna se dan referencias a los tipos de soluciones que se pueden aplicar para mejorar un parámetro sin que empeore el otro. Las soluciones ofrecidas son los 40 principios de inventiva que identificó Altshuller. El orden de los números se debe a que en ese mismo orden es que aparecen más patentes con el principio inventivo en que fue resuelto un problema con igual contradicción. Los principios no son una solución directa a la contradicción, sino una línea de razonamiento para encontrar la solución. Las casillas de la matriz que están vacías implican utilizar otras herramientas de TRIZ que por razones de espacio aquí no se desarrollarán [8]. En la Figura 6 [9], se muestra una parte de la matriz de contradicciones y se señala un detalle del cruce de los parámetros en pugna.

### 3.5. Aplicación TRIZ: Problema con la Corrosión del Electrodo

En el presente caso el problema con la corrosión del electrodo sucede cuando a través de este no circula corriente, la cual evita que los electrones que “exigidos” por el medio, los termine aportando los átomos del metal del electrodo. Así el electrodo deja de portarse catódicamente para hacerlo anódicamente. En la Figura 7 se presenta un esquema gráfico de la situación. La consecuencia directa es que el electrodo se consume ya que el metal al transformarse en iones pierde sus propiedades de este.

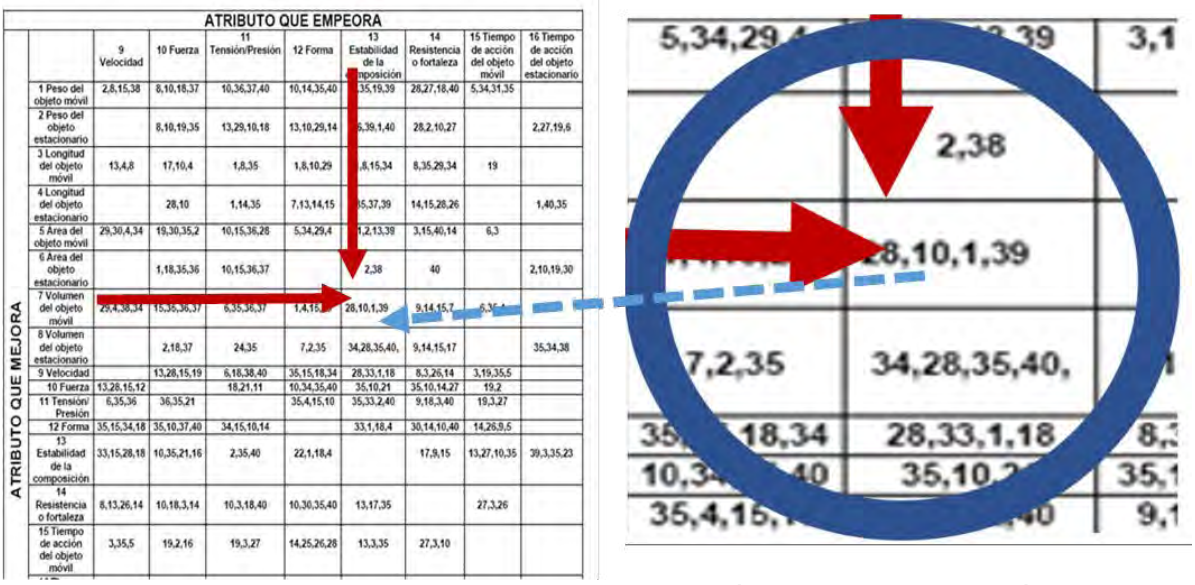



*Figura 6. Vista parcial y detalle de la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas.*

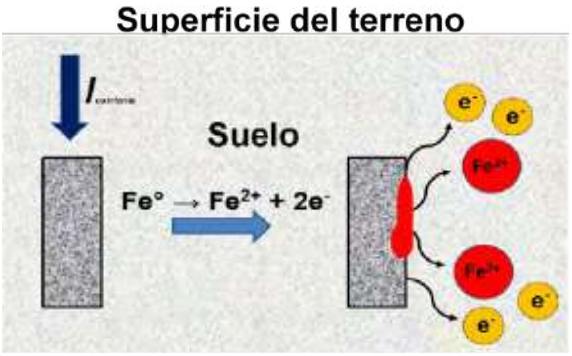



*Figura 7. Esquema gráfico del electrodo de puesta a Tierra.*

Este daño es como consecuencia del comportamiento anódico del metal, dejando como la parte anódica en el material componente del medio circundante, el suelo. Material que está compuesto de una gran cantidad de sustancias covalentes, iónicas y combinaciones de ambas.

El suelo, por exigencias de diseño, debe ser muy conductor, pero esto está en detrimento del metal. Si el suelo no fuera conductor, no tuviera humedad y movilidad iónica, el metal difícilmente experimentaría un proceso corrosivo en su superficie de contacto con el suelo. Este proceso corrosivo lleva al consumo del metal del electrodo. Esto se puede relacionar con el Parámetro de Ingeniería 23 llamado “Pérdida de Materia” o “Desperdicio de Sustancia” que se refiere a la pérdida parcial o total de materia del sistema o de los subsistemas de este (temporal o permanente).

Por otro lado, el medio circundante, el suelo, es el que produce el daño sobre el metal del electrodo. Esto, se relaciona con el Principio de Inventiva 30 denominado “Daño Externo que Afecta a un Objeto”, el cual, se refiere a la susceptibilidad de un sistema a daños infligidos desde el exterior. Ahora realicemos los planteos de los Conflictos Técnicos (CT) 1 y 2, en los cuales, colocaremos cada uno como mejora y empeoramiento y luego invertiremos los papeles, de ahí 1 y 2 para formar finalmente la Contradicción Técnica:

**CT1:** Si, el daño externo que afecta al electrodo mejora, entonces, el suelo es muy conductor (ρ es muy baja, es bueno), pero, la pérdida material del electrodo por corrosión empeora.

**CT2:** Si, el daño externo que afecta al electrodo empeora, entonces, el suelo es poco conductor (ρ es muy alta, es malo), pero, la pérdida material del electrodo por corrosión mejora.

La Figura 8 muestra la expresión de la Contradicción Técnica en base a los Conflictos Técnicos (Requena Carlos E., 2022).

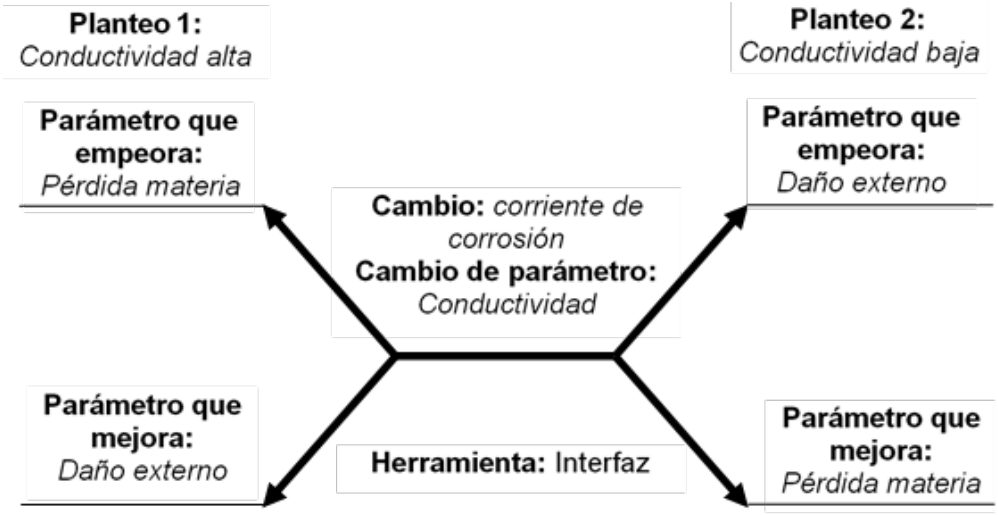



*Figura 8. Diagrama de Contradicciones Técnicas sobre el caso del electrodo de puesta a Tierra.*

Ahora aplicamos la Matriz de Contradicciones. En el caso del CT1, dónde el Parámetro 23 (Pérdida de Materia) empeora y el Parámetro 30 (Daño externo…) mejora, los Principios de Inventiva hallados son:

***Principio 33 (Homogeneidad):*** Objetos secundarios que interactúan con el objeto principal, deben fabricarse del mismo material o de materiales similares al objeto principal.

***Principio 22 (Convertir algo dañino en benéfico):***

a) Convertir dos o varios efectos dañinos en uno benéfico.

b) Incrementar la acción dañina hasta que cesa de serlo.

***Principio 19 (Acción periódica):***

a) Remplazar una acción continua con una periódica o con impulsos.

b) Si una acción ya es periódica, cambiar su frecuencia.

c) Usar pausas entre los impulsos para obtener una acción adicional.

***Principio 40 (Materiales compuestos):*** Usos de los nuevos materiales con características muy especiales.

En el caso del CT2, dónde el Parámetro 23 (Pérdida de Materia) mejora y el Parámetro 30 (Daño externo…) empeora, los Principios de Inventiva hallados son:

***Principio 33 (Homogeneidad):*** ya descripto.

***Principio 22 (Convertir algo dañino en benéfico):*** ya descripto.

***Principio 30 (Acción periódica):***

a) Remplazar una acción continua con una periódica o con impulsos.

b) Si una acción ya es periódica, cambiar su frecuencia.

c) Usar pausas entre los impulsos para obtener una acción adicional.

***Principio 40 (Membranas flexibles o películas delgadas):*** ya descripto.

El principio de inventiva que se destaca por simple visualización de los datos de la matriz es el 33 “Homogeneidad”. Induce a pensar que como la corrosión se produce por la heterogeneidad de propiedades, en este caso electroquímicas, entre materiales vinculados de alguna forma, se debe evitar esta heterogeneidad por una homogeneidad. El suelo no se lo puede cambiar radicalmente, lo más fácil es cambiar el electrodo y mejorar en medio inmediato, de manera de reducir esa heterogeneidad.

La función principal del electrodo es brindar un medio conductor sólido hacia tierra, por eso, se debe buscar un material parecido al material terrestre para evitar la marcada heterogeneidad y a la vez conduzca como un metal. De aquí surge un material que se aproxima a esto y es el grafito. No es igual al material terrestre en cuanto a componentes y estructura, pero se diferencia marcadamente de un metal en cuanto a esto y por lo tanto estaría más cerca del material terrestre. Y conserva, sin embargo, parte de la conductividad “metálica”. En esto se encuentra la coincidencia de resultados de métodos tradicionales y la metodología TRIZ [10].

## 4. USIT

### 4.1. Breve historia del USIT

El USIT (sigla en inglés de: Pensamiento Inventivo Unificado Estructurado) fue creado por el Dr. Ed Sickafus en los años 90 y lo desarrolló en la Ford Motor de Michigan, EE. UU.

### 4.2. Diagrama de flujo del USIT

USIT puede abordar problemas ingenieriles en base a una estructura muy definida que pasaremos a describir:

#### 4.2.1 Problema Bien Definido

Las convoluciones de varios efectos mal definidos simbolizan el planteo del problema inicial. Si esta complicación no se identifica (causa raíz) y se busca resolver rápidamente el problema, el analista puede languidecer en un estado de incertidumbre incapaz de encontrar una posición establecida en la situación del problema. La sección del problema bien definido contiene los pasos diseñados para permitir una rápida definición del problema con un enfoque eficaz [11].

#### 4.2.2 Diagrama del Mundo Cerrado

Una vez que el problema ha sido definido, el analista tiene a su disposición dos métodos de análisis. Uno de ellos es el método del mundo cerrado, que se ejecuta con un conjunto fijo de objetos, es decir, dentro de un mundo cerrado. Esta visión ayuda a focalizar sobre el problema eliminando distractores.

#### 4.2.3 El Método de las Partículas

El Método de las partículas: Este es el segundo método. Tiene la particularidad de aproximar el trabajo desde una solución ideal imaginada hacia atrás, hacia la situación inicial del problema. Pueden ser posibles múltiples configuraciones de partículas en el estado final, pero solo se selecciona una para el análisis.

#### 4.2.4 Las Técnicas de Solución

Son seis técnicas y se las aplica en la última fase del proceso de resolución del problema. A veces, no es necesario agotar el uso de todas las técnicas, pues las soluciones pueden aparecer mucho antes, en cualquier punto a lo largo del proceso del USIT. Las técnicas de solución entran en juego como esfuerzos convenidos para ejercitar las herramientas específicas y encontrar aún más soluciones conceptuales no halladas anteriormente o sumarse a estas. Sus nombres son: Unicidad, Dimensionalidad, Pluralización, Distribución, Transducción y Generificación.

### 4.3. Aplicación del USIT

#### 4.3.1. Separación rápida y eficaz de la clara y la yema en huevos de gallina

Una empresa PyMES de fabricación de cremas heladas utiliza huevos de gallina en la formulación de sus productos [12]. Necesitan separar velozmente la yema de la clara de una gran cantidad de huevos para evitar un “cuello de botella” en la producción. Se busca imperiosamente mejorar esta operación.

***Etapa 1: Definición del problema***

***Paso 1.1- Explicar la situación del problema***

Una empresa PyMES de fabricación de cremas heladas utiliza huevos de gallina en la formulación de…

***Paso 1.2- Descripción verbal y gráfica***

Consiste en escribir lo que aquí está dibujado. La descripción verbal que aquí salteamos es muy poderosa para dirigir el pensamiento hacia un espacio de soluciones conceptuales. Ver Figura 9.

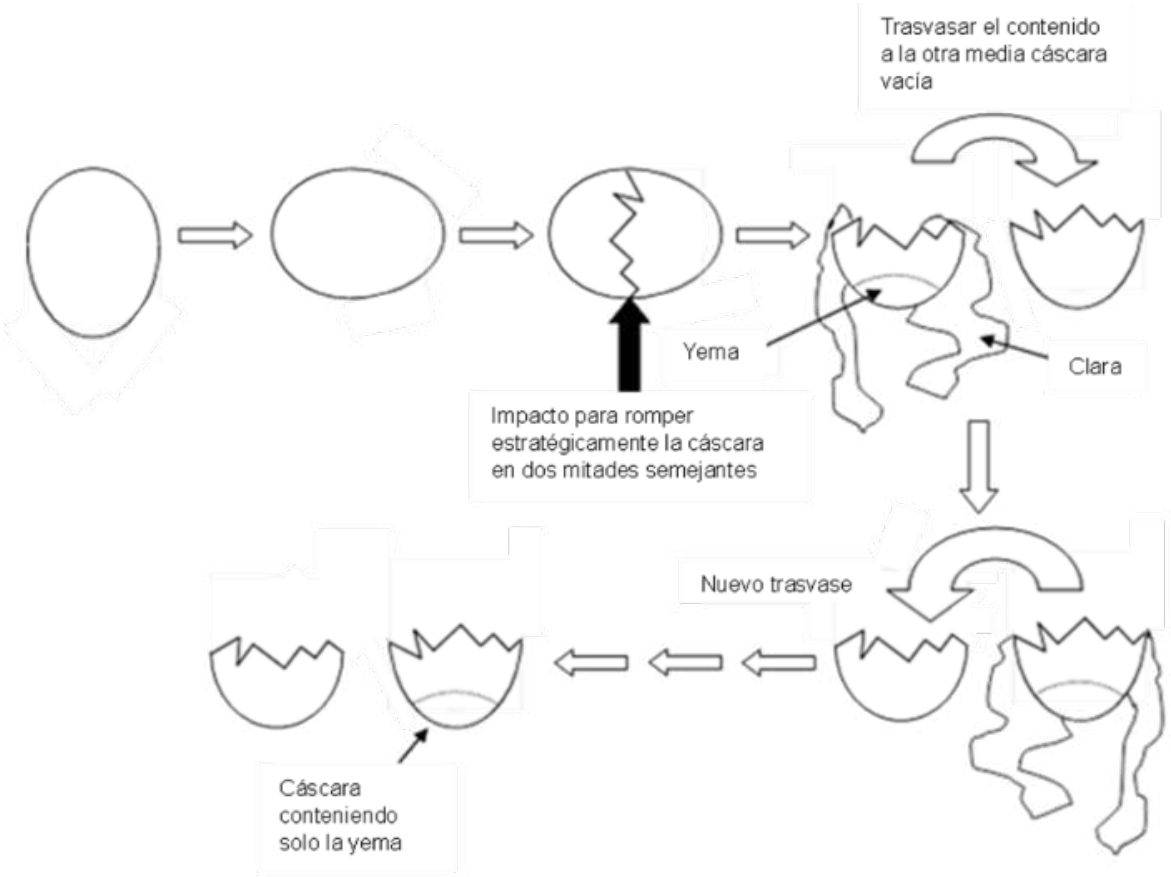



*Figura 9. Descripción gráfica del problema.*

***Paso 1.3- Listar efectos indeseados:*** Ruptura de la yema, Lentitud del proceso, Dependencia de la capacidad del operario, Aumento de la cantidad de operarios, Aumento de costos de operaciones, Contaminación de la clara, Pérdida de yema, Etc.

***Paso 1.4- Seleccionar un efecto:*** Lentitud del proceso

***Paso 1.5- Listar objetos:*** Operario, Huevos, Mesa de trabajo, Aire, Contenedor de clara, Filo para cascar huevos, Contenedor de yema, Tacho de residuos, Luz.

***Paso 1.6- Minimizar objetos:*** Conseguir disminuir nuestra lista nos permite focalizar mejor nuestra atención, así quedan Huevos, Mesa de trabajo, Luz, Aire, Filo para cascar huevos. Seleccionando nuevamente: Huevos, Mesa de trabajo, Filo para cascar huevos. La herramienta para cascar huevos no es tan relevante en la separación de la yema de la clara. Suponemos que el huevo estará bien partido. Si así no fuese, entonces tendríamos otro problema, el partido de la cáscara. Pero aquí no fue presentado como un efecto indeseado. Entonces, le damos de baja de nuestra lista. La herramienta es un objeto vecino. Así queda ahora: Huevos, Mesa de trabajo. Lo mismo podemos decir de la mesa de trabajo. Ahora nuestra lista de objetos, solo se reduce a uno solo objeto: Huevos. Estos están formados por una estructura básica, la cual se compone de cáscara, yema y clara, básicamente. Visto así, un huevo, se nos presenta como un objeto compuesto. La cáscara es de fácil retiro del “sistema huevo”, así, nos focalizamos solamente en la yema y la clara. Esto nos induce a pensar en la interfaz yema-clara. “Eureka”, parece que estamos a punto de encontrar una solución. Conviene anotar la ocurrencia y no olvidar que estamos ante una posible solución. Eso es, una solución. Si proseguimos con el USIT, este nos guiará hacia un espacio de soluciones. Así nuestro balance será más favorable. Así, el analista se despoja de mucha información e influencia distractora del verdadero problema.

***Paso 1.7- Buscar causas raíz:*** (No lo desarrollaremos aquí)

Si uno rompe un huevo de gallina y lo posa sobre una superficie plana observa: La yema está como “flotando” sobre la clara, siendo esta de una relativa viscosidad y por lo observable de mayor densidad que la yema. Ahí se ponen en evidencia dos objetos, clara y yema, perfectamente delineados y en contacto entre sí. Ver Figura 10.

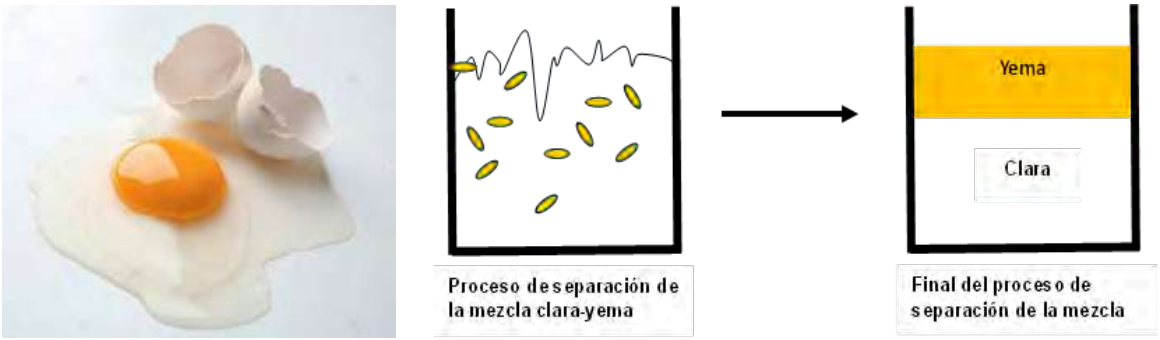
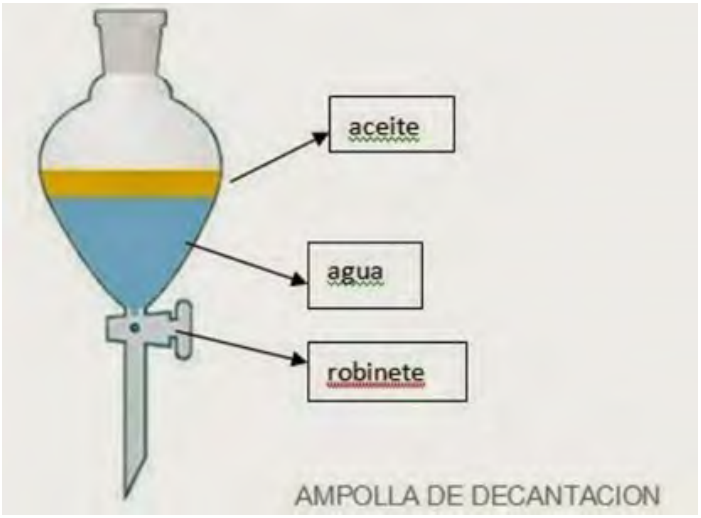



*Figura 10. Yema "flotando" sobre la clara (derecha). b) Caso en mayor escala (izquierda).*

***Solución:*** Separar clara y yema utilizando recipientes altos y de poca superficie. Esto induce pensar en la clásica separación de sistemas heterogéneos de líquidos de la escuela media. Donde utilizamos una ampolla de decantación para separar agua de kerosene. Muchas yemas de menor densidad por la interfaz del vitelio quedan "inmiscible" con las claras de mayor densidad. Ver Figura 11. El proceso aún está incompleto y ya se encontró una muy plausible solución.




***No hay ninguna fuente en el documento actual.*** (Sickafus)*Figura 11. Proceso de separación de la clara y la yema como dos "líquidos inmiscibles".*

## 4. CONCLUSIONES

La mayoría de las metodologías existentes utilizan una alteración del "razonamiento habitual" por un procedimiento propio. Para la generación de ideas, no se requiere ser un experto en el tema sobre el que se razona, aunque, en el proceso de resolución de un problema, hay fases de análisis de las ideas aportadas y de construcción de la solución que deben ser realizadas por especialistas. Este amplio grupo de metodologías y técnicas, que podemos calificar como basadas en la psicología, prescinde voluntariamente de conocimientos previos. Aunque esta forma de trabajar pueda parecer sorprendente, los resultados obtenidos por la aplicación de estas metodologías son sorprendentes. Gracias a ellas se han realizado avances importantes y resueltos problemas de extrema dificultad. TRIZ es única en su concepción ya que surge de un enfoque diferente que consiste en utilizar, en algún modo, el máximo de conocimientos disponibles sobre un problema concreto y llegar a su solución por la adecuación de soluciones aplicadas previamente a problemas similares. Es una metodología estructurada y no al azar como Prueba y Error, Brainstorming, etc., de resolución de problemas ingenieriles y es la primera metodología que se ha definido como "basada en el conocimiento", pero no la única, ya que a partir de ella se han construido, Por ejemplo, USIT, cuyas raíces nacen de TRIZ. Otra derivación de TRIZ es TRIZICS [13] la cual utilizamos y recomendamos en nuestros cursos ya que hace más accesible TRIZ.

## 5. REFERENCIAS


[1] Erick Grudner Carranza, Pablo Castelú Ticona. CREATIVIDAD, INVENTIVA E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA. Revista Tecnológica, AÑO 12 Vol. 10 Nº 16. Instituto de Investigaciones y Aplicaciones Tecnológicas IIAT, Edificio Facultad de Tecnología. Bolivia. 2014

[2] Manuel Luna Alcoba. TRIZ como ars inveniendi – La CIENCIA DE LA CREATIVIDAD DESDE Leibniz hasta Altshuller. 2021. Bibliografía que nos fue facilitada por el autor.

[3] Shunsuke Suzuki (Member of The Society for Equivalent Transformation; Keieigihou Co. Ltd) Equivalent Transformation Thinking; Thinking Process for Creation and Innovation and Its Application. Japan TRIZ Symposium 2011. Abstracts of Presentations.

http://triz-japan.org/PROGRAM&ABSTRACT/2011abstract_e(Japanese).pdf

[4] Shozo Hibino. Theory of Equivalent Transformation and Total Creative Systems Design Strategy. 1979.

[5] Ienni L. Ejemplo de ejercicio tomado de un trabajo práctico de la materia electiva “Metodologías para el Desarrollo de la Creatividad en Ingeniería” asignatura electiva de 3er año de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional General Pacheco, Argentina. Alumnos: Ienni L., Zanier B., Ramos N., Gutierrez A., Guillaumé W. 2017

[6] Nakagawa Toru. Prefacio del editor (25 de septiembre de 2001) https://www.osaka-gu.ac.jp/php/nakagawa/TRIZ/jpapers/Ichikawa010918/IchikawaET010918.html

[7] Arbore, L. et al. Los 40 Principios de Inventiva de TRIZ: Metodologías para el Desarrollo de la Creatividad en Ingeniería. Manual. 1ra Edición. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: edUTecNe, 2019. Libro digital, PDF. ISBN 978-987-4998-11-8. http://ria.utn.edu.ar/handle/123456789/4038

[8] Ricardo Marino, Juan Carlos Nishiyama, Luciano Arbore, Tatiana Zagorodnova, Carlos Requena. Los 10 principios de inventiva adicionales de TRIZ. Manual. 1ra Edición. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: edUTecNe, 2023. Libro digital, PDF. ISBN 978-987-8992-11-2

http://hdl.handle.net/20.500.12272/7597

[9] Enrique Rico Arzate, Margarito Coronado Maldonado. La Metodología más Moderna para Inventar O Innovar Tecnológicamente de Manera Sistemática. Editor: Panorama México, 2004. ISBN-13: 978-9683813596

[10] Requena Carlos E., Nishiyama J. C., Crisanti José. IV CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2021 - Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Delta. Selección de Material para “Electrodo de PAT” Mediante TRIZ. Fue suspendido a modo virtual en 2021 y se pasó a modo presencial para el 2022 EdUTecNe ISBN 978-987-8992-32-7

[11] Sickafus, E., “Unified Structured Inventive Thinking – How to Invent”, Ntelleck, LLC, Grosse Ile, MI, USA, ISBN 0-965-94350-X. (www.u-sit.net). 1995

[12] Requena C., Nishiyama J. C. Problema de la separación rápida y eficaz de la clara y la yema en huevos de gallina, aplicación del USIT en el 6to Congreso Iberoamericano de Innovación Tecnológica Basado en TRIZ, octubre de 2011, Querétaro, México. http://trizrealworld.blogspot.com/

[13] Gordon Cameron - TRIZICS: Teach yourself TRIZ, how to invent, innovate and solve "impossible" technical problems systematically. www.trizics.com. 2010. ISBN 1456319892

# “PROBLEMAS ENCONTRADOS EN LA MEDICIÓN DE TENSIONES, CORRIENTES Y COS Φ”

Agostino, Nicolás E.; García, Federico; Miquel, Guillermo L.

*Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas, Universidad Nacional de La Matanza.*

*San Justo, Buenos Aires, Argentina*

*nagostino@alumno.unlam.edu.ar*

**RESUMEN**

En el contexto de la investigación respecto de la Eficiencia Energética en la Universidad Nacional de La Matanza (UNLaM), Análisis de las Medidas Paliativas a Implementar Respecto al Uso De Energía Eléctrica y Agua en la Universidad Nacional De La Matanza, cuyo propósito es optimizar los consumos de energía, se ha diseñado un dispositivo de control para los dispensadores de agua fría-caliente previamente citados en otros estudios.

Continuando con el trabajo previo, Medición de Variables en un Dispositivo Administrador de un Dispensador de Agua, donde se especificó la medición de tensión y corriente de la red de alimentación para obtener las variables de interés, este nuevo estudio se enfoca en los obstáculos superados durante el desarrollo del hardware de medición.

Se describen dichos problemas y sus soluciones con el propósito de servir de guía para futuras investigaciones en el área.

**Palabras Claves:** Eficiencia, Energía, Optimización

**ABSTRACT**

In the context of the research regarding Energy Efficiency at the National University of La Matanza (UNLaM), [and the project titled] "Analysis of Palliative Measures to Implement Regarding the Use of Electrical Energy and Water at the National University of La Matanza," whose purpose is to optimize energy consumption, a control device has been designed for the hot-cold water dispensers previously cited in other studies.

Continuing with the previous work, "Measurement of Variables in a Management Device for a Water Dispenser," where the measurement of voltage and current from the power supply network was specified to obtain the variables of interest, this new study focuses on the obstacles overcome during the development of the measurement hardware.

These problems and their solutions are described with the purpose of serving as a guide for future research in the area.

**Keywords:** Efficiency, Energy, Optimization

## 1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética se ha convertido en un tema central para muchas instituciones, y las universidades no son la excepción. Reducir el consumo de electricidad y aprovechar mejor los recursos no solo significa un ahorro económico, sino también un aporte concreto al cuidado del medioambiente.

En la Universidad Nacional de La Matanza (UNLaM) se lleva adelante, desde 2023, un proyecto que busca mejorar el uso de energía eléctrica en sus instalaciones. Dentro de las distintas áreas de trabajo, se destacó el control del uso de los dispensadores de agua frío-calor, que están presentes en distintos sectores de la Universidad, funcionando de manera continua. A pesar de su aparente bajo consumo individual, el uso conjunto de muchos de estos equipos representa un gasto energético importante a lo largo del tiempo.

En trabajos anteriores, se diseñó un dispositivo capaz de controlar estos dispensadores y, además, medir variables eléctricas como tensión, corriente y factor de potencia. Ese avance permitió registrar datos de funcionamiento y analizar posibles mejoras en la eficiencia. Sin embargo, durante las pruebas surgieron diferencias notables entre las mediciones realizadas por el prototipo y las obtenidas con un medidor comercial calibrado.

Estas inconsistencias marcaron el inicio de una nueva etapa: revisar en detalle el hardware y el firmware para detectar dónde estaban las fallas y cómo corregirlas. El presente trabajo documenta los problemas técnicos encontrados en las etapas de medición y procesamiento de señales, así como las soluciones de hardware y firmware implementadas para corregirlos. El objetivo es optimizar el rendimiento del dispositivo desarrollado y generar un registro técnico que sirva de guía para futuros proyectos de medición y control en el área de eficiencia energética.

## 2. METODOLOGÍA.

El prototipo desarrollado para este trabajo se basa en un microcontrolador ESP32 (Espressif Systems, 2023), encargado de adquirir las señales provenientes de los sensores y procesar los cálculos de tensión eficaz, corriente eficaz y factor de potencia.

Para la medición de corriente se utilizó un sensor ACS712 (Allegro Microsystems, 2024), mientras que la tensión de red se midió mediante un sensor ZMPT101B (Micro-Transformer). Ambos entregan una señal analógica senoidal con amplitud nominal de 5 V, que fue acondicionada a 3,3 V mediante divisores resistivos para adaptarse a las entradas analógicas del microcontrolador. La activación y desactivación de la carga se realizó mediante un relé controlado por el propio ESP32.

En la etapa inicial del desarrollo, el firmware utilizó la biblioteca EmonLib (OpenEnergyMonitor, 2014), que provee rutinas para el cálculo de valores RMS y del factor de potencia a partir de señales de tensión y corriente.

Como referencia de comparación se empleó un medidor comercial STAND BY MC10 (Stand By Instruments), de clase de precisión especificada en su hoja técnica. Este equipo permitió contrastar las mediciones del prototipo con valores obtenidos por un instrumento calibrado.

### 2.1. Procedimiento de pruebas.

Las pruebas se realizaron sobre un dispensador de agua frío-calor instalado en el laboratorio, manteniendo condiciones estables de alimentación y carga durante cada medición. Se ensayaron tres modos de funcionamiento:

- Modo frio.
- Modo caliente.
- Funcionamiento simultáneo de ambos sistemas.

En cada caso, el dispositivo registró las magnitudes de interés —tensión eficaz, corriente eficaz, potencia activa y factor de potencia—, mientras que en paralelo el medidor comercial STAND BY MC10 realizaba la misma medición para contar con una referencia calibrada.

La comparación de los datos permitió detectar discrepancias recurrentes entre el prototipo y el instrumento de referencia. A partir de este análisis, se identificaron una serie de problemas en el hardware y en el procesamiento de señales, cuya descripción y las soluciones implementadas se presentan en las siguientes secciones.

## 3. DESARROLLO.

Durante la fase de puesta en marcha del prototipo, y en particular en el proceso de validación de sus mediciones frente a un instrumento comercial calibrado, se identificaron diversas discrepancias y comportamientos inesperados en los valores de tensión, corriente y factor de potencia.

El análisis de estas diferencias permitió aislar una serie de problemas de origen tanto en el hardware como en el firmware del sistema.

En esta sección se describen los problemas más relevantes detectados, junto con las soluciones implementadas y los resultados obtenidos tras cada modificación.

### 3.1. Sensibilidad del sensor de corriente.

En la versión inicial del prototipo se empleó un sensor de efecto Hall ACS712-30A para la medición de corriente. Este modelo entrega una señal analógica de 0 a 5 V proporcional a un rango de corriente de –30 A a +30 A. Aunque este margen permite cubrir cargas elevadas, resultó sobredimensionado para el consumo real del dispensador evaluado.

Las mediciones realizadas durante las pruebas mostraron que la corriente eficaz del equipo estaba muy por debajo de ese rango, como se observa en la Tabla 1. Este desajuste hacía que el sensor entregara señales de baja amplitud en relación con su rango total, desaprovechando gran parte de la resolución disponible del ADC del ESP32 y disminuyendo la precisión en las mediciones, especialmente en los modos de menor consumo.

*Tabla 1 Corriente eficaz medida para cada modo de funcionamiento.*

| Modo de Funcionamiento | Corriente eficaz ($I_{RMS}$) aproximada |
|---|---|
| Frío | 0,75 A |
| Caliente | 2,10 A |
| Frío + Caliente | 2,50 A |

La Figura 1 muestra la relación tensión de salida–corriente para los tres modelos de la familia ACS712 (5 A, 20 A y 30 A). Según la hoja de datos de Allegro MicroSystems, el parámetro IP (A), especificado como “Current Sensing Range”, corresponde al rango de corriente eficaz (RMS) máximo medible de forma continua, tanto en corriente alterna como en continua. Para el modelo de 5 A, este valor es ±5 A RMS, lo que resulta más que suficiente para el dispensador evaluado, cuyo consumo máximo medido fue de 2,5 A RMS. Esto deja un margen considerable para picos de arranque o transitorios sin comprometer la linealidad de la medición.

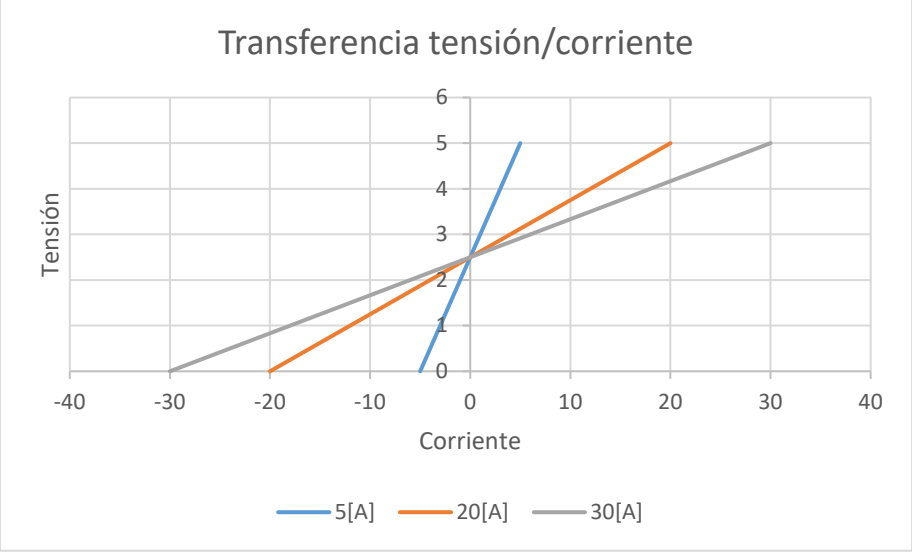



*Figura 1 Transferencia corriente/tensión de los sensores ACS712.*

Se sustituyó entonces el ACS712-30A por el ACS712-5A, obteniendo una mayor pendiente en la salida (≈185 mV/A) y, por tanto, un mejor aprovechamiento del rango de conversión del ADC. Con esta modificación se logró mejorar la sensibilidad del sistema y aprovechar mejor el rango del ADC, lo que constituyó un primer paso para reducir las diferencias respecto a las mediciones de referencia. Sin embargo, aún persistían otros factores que afectaban la exactitud general del sistema, los cuales se abordan en los apartados siguientes.

### 3.2. Alimentación de los sensores.

En la versión inicial del prototipo, los sensores ACS712 y ZMPT101B se alimentaban directamente desde una fuente conmutada de 220 VAC a 5 VDC. Durante las mediciones en laboratorio, se verificó mediante osciloscopio digital UNI-T UTD1050DL (UNI-T) que la salida de esta fuente presentaba un rizado (ripple) de aproximadamente 240 mV pico a pico, con una frecuencia cercana a 1 kHz y una forma de onda tipo tipo diente de sierra (Figura 2).

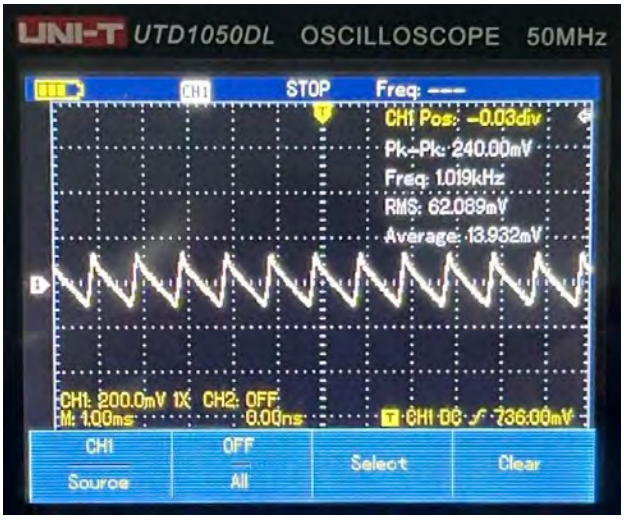



*Figura 2 Señal de alimentación usando fuente conmutada de 220 VAC a 5 VDC.*

Con el fin de evaluar el impacto de la alimentación sobre la calidad de la señal, se desarrolló un código específico que permitiera almacenar las muestras obtenidas por los sensores y enviarlas por puerto serie para su posterior análisis en una planilla de cálculo. En la Figura 3 se observa como el ripple se superponía a las señales medidas, afectando su forma y estabilidad, generando pequeñas variaciones no atribuibles al consumo real del dispositivo.




*Figura 3 Señales brindadas por los sensores usando fuente conmutada de 220 VAC a 5 VDC.*

Posteriormente, se implementó una nueva configuración de alimentación compuesta por una fuente conmutada de 220 VAC a 9 VDC, seguida de un regulador lineal 7805 con capacitores de filtrado. Con esta modificación se repitieron las mediciones (Figura 4), comprobándose una mejora significativa en la forma de la señal y una reducción notable del ruido superpuesto.

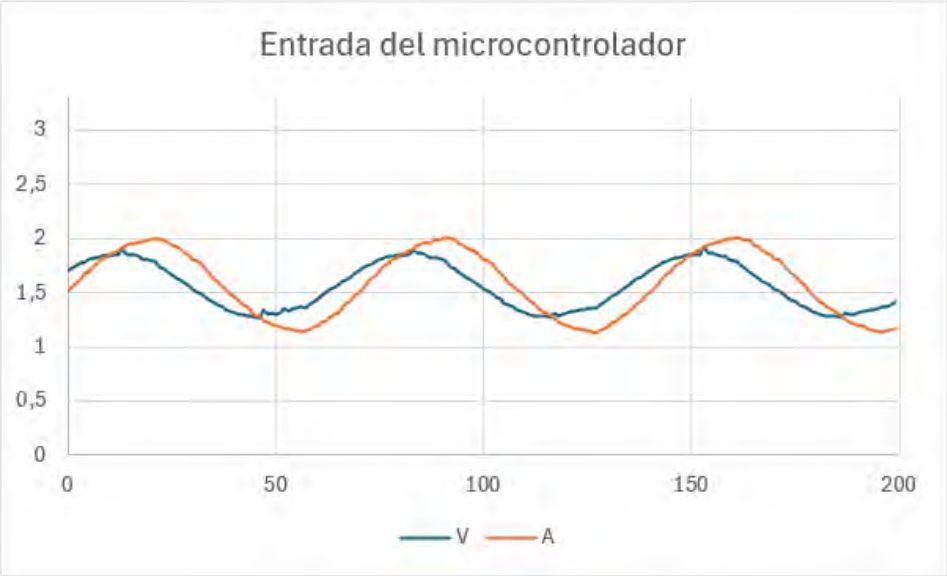



*Figura 4 Señales brindadas por los sensores usando regulador lineal 7805.*

### 3.3. Método de muestreo.

En las versiones iniciales del firmware, el cálculo del período de la señal y de las magnitudes eléctricas se realizaba empleando la biblioteca EmonLib. El método implementado consistía en detectar un valor fijo en la señal de tensión medida, y contar dos repeticiones sucesivas de dicho valor para definir un período de la señal (Figura 5).

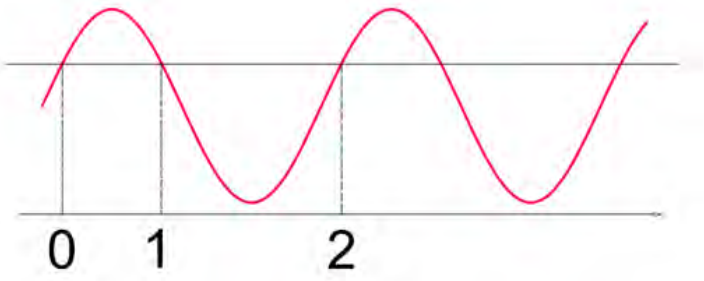



*Figura 5 Cruces de señal por valor fijo de tensión en senoidal pura.*

Si bien este procedimiento es simple, resulta adecuado únicamente para señales senoidales puras, libres de distorsión armónica. En cargas reales como el dispensador de agua —que integra compresor, resistencia calefactora y electrónica de control—, la presencia de armónicos y variaciones en la forma de onda provoca que este método no identifique con exactitud el período real.

En la Figura 6 se presenta un ejemplo de una señal senoidal fundamental (trazo azul) a la que se le han sumado componentes armónicas de 3ª y 5ª orden, obteniéndose la señal distorsionada (trazo naranja). Este tipo de distorsión puede modificar la forma de onda de tal manera que, si el método de detección de período se basa en la comparación con un valor fijo de tensión, podrían registrarse múltiples cruces en un mismo ciclo, dependiendo del valor fijado aleatoriamente. En particular, en este ejemplo se observa un caso en el que se registran hasta cinco cruces con el valor de referencia antes de que la señal haya completado siquiera la mitad de su período, lo que conduciría a errores en la determinación del período y, en consecuencia, en los cálculos de las magnitudes eléctricas.

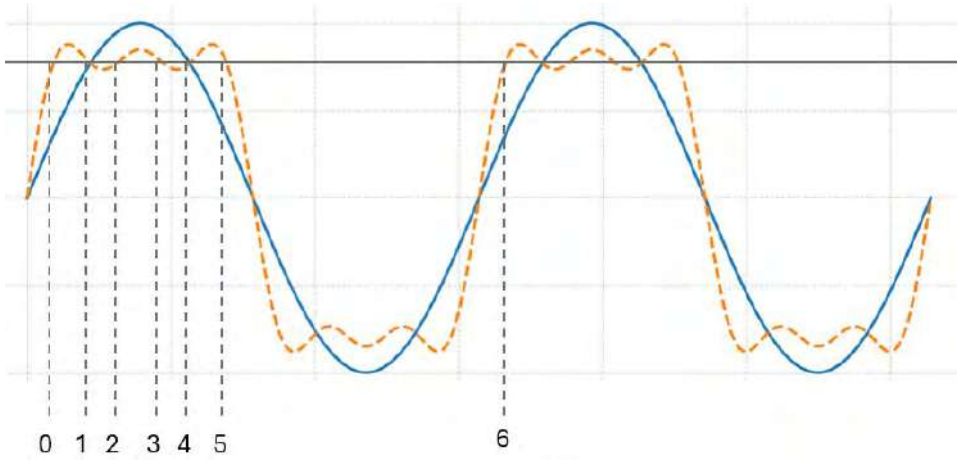



*Figura 6 Cruces de señal por valor fijo de tensión en senoidal con distorsión armónica.*

Para no depender de la condición de la señal medida, se incorporó un circuito detector de cruce por cero basado en el optoacoplador 4N25 (Vishay Semiconductors, 2025), encargado de generar una señal digital de referencia cada vez que la tensión de red atraviesa el valor cero (Figura 7). La simulación presentada en la Figura 8 ilustra la relación entre la señal de entrada correspondiente a la tensión de línea y la señal de salida generada por el circuito.

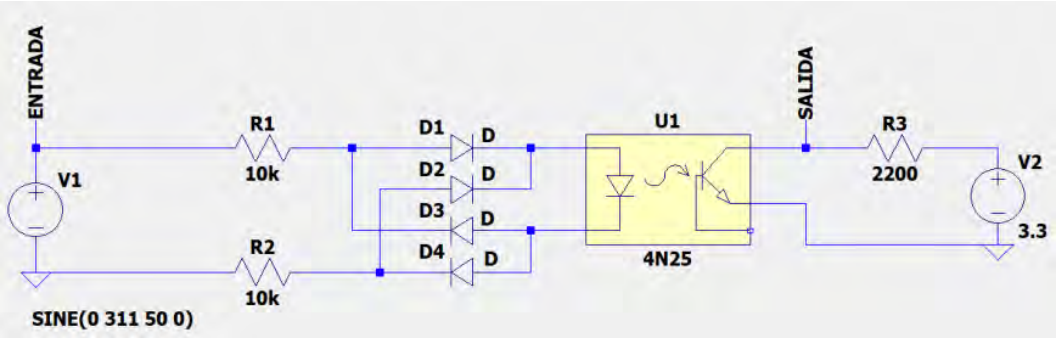



*Figura 7 Circuito esquemático de detector de cruce por cero.*

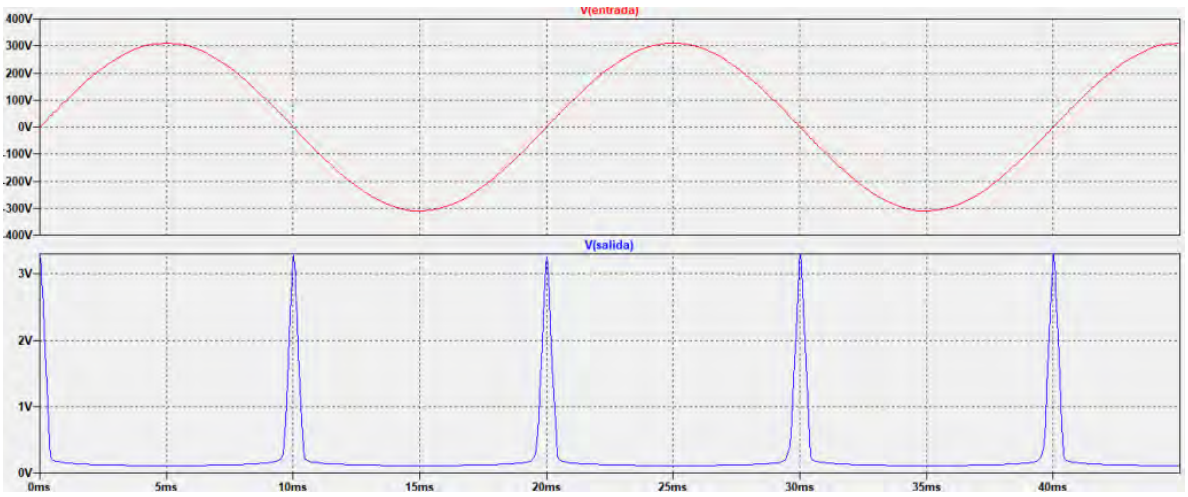



*Figura 8 Simulación de señales de detector de cruce por cero.*

Estos pulsos se capturan en una entrada digital del microcontrolador y se utilizan como señal de sincronización para iniciar el muestreo de tensión y corriente siempre en el mismo punto del ciclo. De esta manera, se garantiza que las mediciones de ambos canales se realicen de forma estable y coherente con el período real de la red.

La implementación del detector de cruce por cero permitió estabilizar la detección del período de la señal, reduciendo la variabilidad en los cálculos y mejorando la coherencia entre mediciones sucesivas.

### 3.4. Ajuste de calibración de las señales.

El objetivo de esta etapa fue obtener, luego de las mejoras realizadas en el hardware, mediciones confiables de las variables eléctricas registradas por el sistema, logrando que se correspondan con las obtenidas mediante un medidor comercial de referencia. Para ello se desarrolló un firmware específico capaz de almacenar las muestras tomadas por los sensores y enviarlas por puerto serie para su posterior análisis en planilla de cálculo.

#### 3.4.1 Calibración de tensión y corriente

Se comenzó el análisis midiendo la señal de tensión de línea. Conociendo su valor eficaz (VRMS) y, a partir de él, su valor pico (Vp) y pico a pico (Vpp), se ajustó la constante de calibración que multiplica los valores muestreados para que el Vpp obtenido coincidiera con el esperado. Posteriormente se corrigió el desplazamiento vertical de la señal aplicando un offset, calculado como la diferencia entre el promedio de las muestras y el valor medio teórico del ADC (2048 para una resolución de 12 bits).

Se aplicó el mismo procedimiento para la calibración de corriente, utilizando como referencia una carga puramente resistiva de consumo conocido. Se ajustó la constante de calibración y el offset para centrar la señal y escalarla adecuadamente. Se verificó el correcto cálculo sobre distintos valores de carga.

Con estos ajustes, se lograron resultados muy similares a los obtenidos con el medidor comercial en tensión eficaz, corriente eficaz y potencia aparente. Estas magnitudes se calculan en el código mediante las siguientes ecuaciones (Alexander & Sadiku, 2009):

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum {V_i}^2} \quad (1)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum {I_i}^2} \quad (2)$$

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (3)$$

Donde N es la cantidad de muestras, y $V_i$ e $I_i$ representan los valores de tensión y corriente en el instante i, ya corregidos con sus respectivas constantes de escala y offset.

No obstante, el valor del factor de potencia (cos φ) seguía presentando desviaciones respecto del esperado. Este error se debía a un cálculo incorrecto de la potencia activa, originado por un desfasaje entre las señales de tensión y corriente. Cuando ambas señales no se encuentran perfectamente alineadas en fase, el producto instantáneo utilizado para el cálculo de la potencia activa se ve afectado, generando un cos φ erróneo.

#### 3.4.2 Calibración de fase.

Dado que la carga utilizada en las pruebas era puramente resistiva, se esperaba que las señales de tensión y corriente estuvieran idealmente en fase. Sin embargo, el análisis de las gráficas obtenidas (Figura 9) evidenció un desplazamiento temporal entre ambas, lo que provocaba una subestimación de la potencia activa (P) y, en consecuencia, un valor incorrecto del factor de potencia (cos φ).

Para resolver este problema, se implementó un ajuste de fase mediante el desplazamiento de muestras. Este procedimiento consiste en aplicar un corrimiento de índice sobre una de las señales — en este caso, la de corriente — con respecto a la de tensión, antes de efectuar el cálculo de la potencia activa. Matemáticamente, el cálculo se expresa en la Ecuación (4), donde δ representa el número de muestras en que se adelanta o retrasa la señal de corriente para lograr la alineación en fase.

$$P = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} V_i \cdot I_{(i+\delta)} \quad (4)$$

El valor de δ se determinó de forma empírica, analizando los cruces por cero de ambas señales en las muestras obtenidas. A partir de esta observación, se detectó que la señal de corriente presentaba un retardo aproximado de 5 muestras respecto de la tensión.

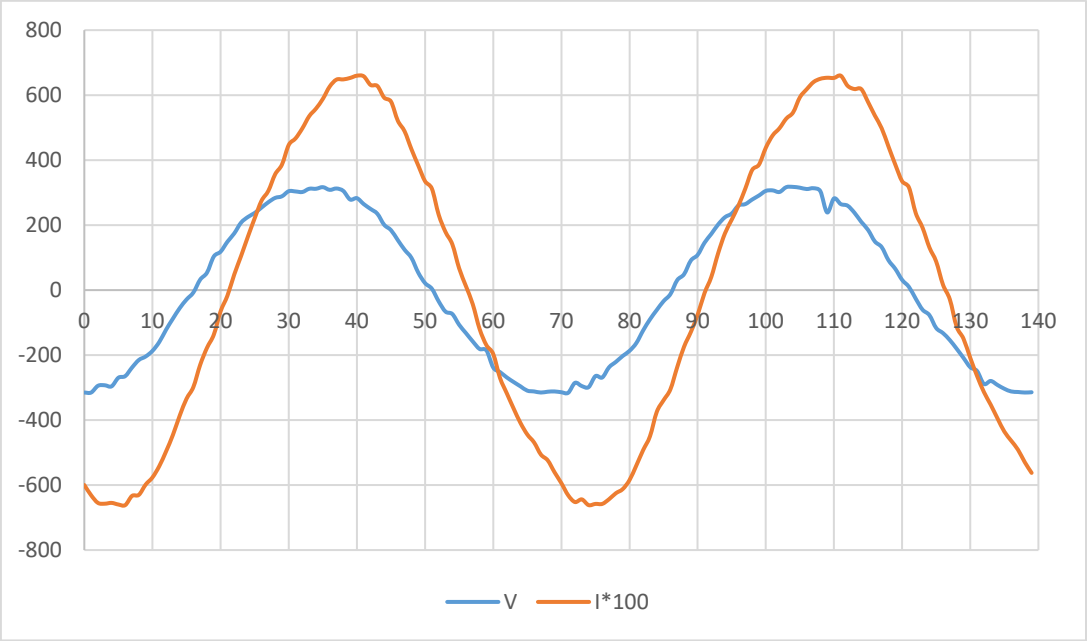



*Figura 9 Señales de tensión y corriente sin ajuste de fase.*

En las señales capturadas en la Figura 10, se aprecia que ambas señales se encuentran alineadas en fase, con coincidencia en los máximos, mínimos y cruces por cero. Con este ajuste, se logró alinear correctamente ambas señales, obteniendo un cálculo más preciso de la potencia activa y un factor de potencia (cosϕ) cercano a 1, tal como se espera en una carga puramente resistiva.

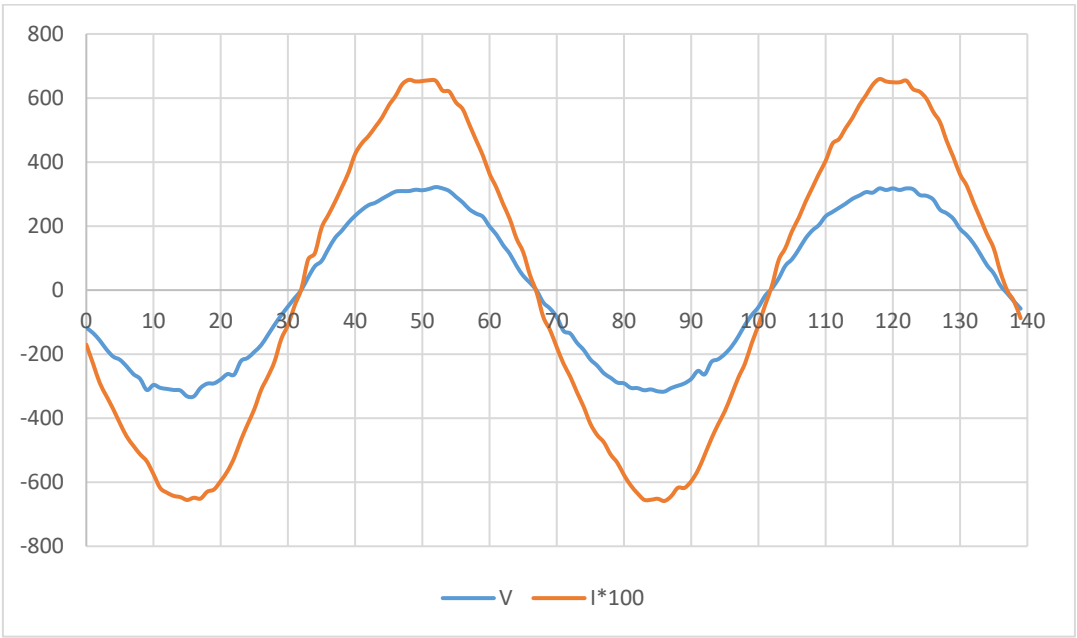



*Figura 10 Señales de tensión y corriente con ajuste de fase.*

## 4. CONCLUSIONES.

A lo largo de este trabajo se documentaron los principales problemas encontrados durante el desarrollo de un sistema de medición de variables eléctricas para dispensadores de agua frío-calor, así como las soluciones implementadas para resolverlos y mejorar la precisión del dispositivo.

El primer ajuste consistió en reemplazar el sensor de corriente ACS712-30A por el modelo ACS712-5A, optimizando así la sensibilidad y aprovechando mejor el rango del conversor ADC del microcontrolador, dado que las corrientes medidas se encontraban muy por debajo de 30 A RMS.

Posteriormente, se abordó el problema del rizado en la alimentación de los sensores. La sustitución de la fuente conmutada de 5 V por una de 9 V en conjunto con un regulador lineal 7805 y filtrado capacitivo redujo significativamente el ripple, proporcionando señales más limpias y estables para el muestreo.

En cuanto al método de adquisición de datos, se reemplazó la detección de período por nivel fijo (empleada por la biblioteca EmonLib) por un sistema de sincronización mediante detector de cruce por cero basado en optoacoplador. Esto permitió que el muestreo se inicie siempre en el mismo punto del ciclo de la tensión de red, evitando errores derivados de la distorsión armónica.

Finalmente, se realizó una calibración completa de las señales de tensión y corriente, ajustando tanto la amplitud como la fase. La validación en condiciones reales se llevó a cabo sobre un dispensador en sus tres modos de operación, comparando los valores calculados por el dispositivo desarrollado, con los obtenidos mediante el medidor comercial STAND BY MC10 de referencia. Los resultados, reflejados en la Tabla 2, mostraron una alta concordancia entre ambas mediciones, lo que confirma la confiabilidad del sistema tras las mejoras implementadas.

*Tabla 2 Comparación de mediciones entre el sistema desarrollado y el medidor de referencia*

| Estado | $V_{RMS}$ [V] | | $I_{RMS}$ [A] | | P [W] | | cosϕ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Desarollo | Referencia | Desarollo | Referencia | Desarollo | Referencia | Desarollo | Referencia |
| Frío | 219,2 | 218,5 | 0,654 | 0,716 | 63,39 | 65,7 | 0,44 | 0,44 |
| Calor | 216,5 | 216,0 | 1,971 | 2,038 | 423,87 | 444,6 | 0,99 | 1 |
| Frío + Calor | 217,7 | 214,9 | 2,361 | 2,439 | 494,93 | 510,7 | 0,96 | 0,97 |

Además de optimizar este desarrollo en particular, la experiencia adquirida y las soluciones documentadas pueden servir como referencia para futuros proyectos de instrumentación y monitoreo orientados a la eficiencia energética, tanto en entornos académicos como en aplicaciones industriales.

## 5. REFERENCIAS.


Alexander, C., & Sadiku, M. (2009). *Fundamentals of Electric Circuits.* New York: McGraw-Hill.

Allegro Microsystems. (2024). *Allegro MicroSystems Official Website*. Obtenido de ACS712 – Fully integrated, Hall-effect current sensor IC datasheet: https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx

Espressif Systems. (2023). *Espressif.* Obtenido de ESP32-WROOM-32 Datasheet: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf

Micro-Transformer. (s.f.). *Micro-Transformer Official Website.* Obtenido de ZMPT101B Voltage Transformer Datasheet: https://5krorwxhmqqirik.leadongcdn.com/ZMPT101B+specification-aidijBqoKomRilSqqokpjkp.pdf

OpenEnergyMonitor. (01 de 2014). *EmonLib – Arduino Energy Monitoring Library*. Obtenido de OpenEnergyMonitor: https://github.com/openenergymonitor/EmonLib

Stand By Instruments. (s.f.). Manual de Usuario – Medidor MC10.

UNI-T. (s.f.). *UTD1050DL Digital Storage Oscilloscope – User's Guide.* Obtenido de UNI-TREND Technology (China) Co., Ltd.: https://unitrend.oss-cn-hongkong.aliyuncs.com/uploads/attach/20250624/1021344ed99ea1acccb477f207689.pdf

Vishay Semiconductors. (2025). *4N25, 4N26, 4N27, 4N28 Phototransistor Optocoupler.* Obtenido de Vishay Intertechnology, Inc.: https://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf

# DISEÑO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA IMPULSAR LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL EMPRESARIAL. UN ESTUDIO DE CASO

Gioitta, José Ignacio; Rouco, Mayra Florencia; Tabone, Luciana; Ispizúa, Jeremías

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata*
*joseignaciogioitta@gmail.com; maayrouco@gmail.com;*
*lutabone@gmail.com; jere.ispizua@gmail.com*

**RESUMEN**

El presente trabajo consistió en un estudio de caso realizado en la empresa metalmecánica, donde, a partir de un primer acercamiento, se identificaron limitaciones en su sistema de información. Esta problemática evidenció la necesidad de avanzar hacia un proceso de transformación digital orientado a mejorar la gestión interna y fortalecer la competitividad de la empresa en el marco de la Industria 4.0. En este contexto, el objetivo fue analizar el sistema de información y proponer mejoras mediante la incorporación de aplicaciones low-code. Se adoptó la metodología Investigación Operativa Soft, que permitió estructurar el problema desde una perspectiva sistémica. A partir del diagnóstico, se identificaron oportunidades de mejora en la documentación, el procesamiento y la comunicación de la información. Se propuso el desarrollo de aplicaciones low-code, utilizando el Proceso Analítico Jerárquico para seleccionar la plataforma más adecuada. Asimismo, se diseñó un tablero en Power BI, una política de gestión de la información, y pautas para un procedimiento de mantenimiento post venta. Finalmente, se definieron lineamientos para la implementación, que incluyen recursos necesarios, capacitación, estrategias de comunicación e indicadores para evaluar impacto y adopción. Este trabajo sienta las bases para una transformación digital, que fortalecerá la gestión interna y la toma de decisiones, favoreciendo la adopción de un enfoque de Inteligencia de Negocios.

**Palabras Claves:** transformación digital; sistema de información; Investigación Operativa Soft; Proceso Analítico Jerárquico; aplicaciones low-code.

**ABSTRACT**

This work consisted of a case study done at the metal-mechanical company, where, from an initial approach, limitations were identified in its information system. This issue highlighted the need to move toward a digital transformation process aimed at improving internal management and strengthening the company's competitiveness within the framework of Industry 4.0. In this context, the objective was to analyze the information system and propose improvements through the incorporation of low-code applications. The Soft Operational Research methodology was adopted, which allowed the problem to be structured from a systemic perspective. Based on the diagnosis, opportunities for improvement were identified in documentation, information processing, and communication. The development of low-code applications was proposed, using the Analytic Hierarchy Process to select the most suitable platform. In addition, a Power BI dashboard, an information management policy, and guidelines for a post-sale maintenance procedure were designed. Finally, implementation guidelines were defined, including required resources, training, communication strategies, and indicators to evaluate impact and adoption. This work lays the foundation for a digital transformation that will strengthen internal management and decision-making, fostering the adoption of a Business Intelligence approach.

**Keywords:** digital transformation; information systems; Soft Operational Research; Analytic Hierarchy Process; low-code applications.

## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente de la información constituye un pilar estratégico para las organizaciones, ya que permite coordinar, analizar y utilizar datos de manera más efectiva, lo que impacta directamente en su competitividad y capacidad de adaptación (Laudon y Laudon, 2012). En el marco de la Industria 4.0, las empresas se enfrentan al desafío de integrar herramientas digitales que les permitan gestionar grandes volúmenes de información en tiempo real. La evolución hacia estos modelos más integrados y dinámicos ha sido impulsada por el desarrollo de la tecnología de la información, que ha transformado tanto las estructuras organizacionales como los procesos de gestión empresarial. En este sentido, los sistemas de información no sólo permiten automatizar tareas operativas, sino también facilitar el acceso a información crítica y respaldar la toma de decisiones en todos los niveles de la organización (Vega Briceño, 2005).

El trabajo se desarrolla en una empresa dedicada a la fabricación de maquinaria agrícola en la cuidad de Balcarce. La misma carece con un sistema sólido y estructurado que facilite la documentación, el procesamiento y la circulación de la información entre las distintas áreas. Esta problemática genera duplicaciones de tareas, pérdida de tiempo y dificultades para la toma de decisiones oportunas, afectando directamente la productividad y la capacidad de respuesta. La situación refleja los desafíos que enfrentan las empresas en la era de la Industria 4.0 y subraya la importancia de desarrollar soluciones tecnológicas que optimicen la gestión de la información y fortalezcan la competitividad empresarial.

Para los fines de este trabajo, se definió como objetivo general analizar el sistema de información de la empresa mediante la aplicación de la metodología de Investigación Operativa Soft, con el fin de proponer una mejora a partir de herramientas tecnológicas. En línea con ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos: analizar la gestión actual de la información de los procesos; describir la utilización y el intercambio de la información entre los distintos niveles y actores de la empresa; proponer mejoras en función del análisis realizado; y comparar diferentes alternativas de herramientas tecnológicas de la industria 4.0 y seleccionar la más adecuada.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo se basa en un estudio de caso abordado mediante una investigación mixta (cualitativa y cuantitativa). En primer lugar, es necesario comprender la dinámica de los procesos, flujos de información y la interacción de los diferentes actores. Para ello, se confecciona un mapa de procesos y diagramas de flujo. La información necesaria se recolecta mediante la aplicación de técnicas como entrevistas no estructuradas a los actores involucrados y análisis de datos de fuentes secundarias.

En una primera etapa, mediante el uso de *Soft System Methodology* (SSM), una metodología clave de Investigación Operativa Soft, se estructura el problema y se detectan las principales debilidades. Esta metodología promueve una comprensión sistémica del problema mediante la aplicación de técnicas participativas y sistemáticas (Checkland y Poulter, 2020). Se determinan las áreas de mayor impacto y se avanza con la constitución de las definiciones raíces, es decir, con la definición de los procesos que se desean transformar.

La siguiente etapa consiste en relevar las herramientas informáticas actuales y analizar tecnologías *low-code* disponibles en el marco de la Industria 4.0. Para seleccionar la opción más adecuada, se utiliza el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), una herramienta útil en la toma de decisiones con múltiples alternativas y diversos objetivos o puntos de vista en conflicto (Alberto y Carignano, 2013). Luego, se desarrolla un prototipo funcional enfocado en el área prioritaria previamente identificada, utilizando la plataforma seleccionada anteriormente. Asimismo, se propone la adopción de sistemas de Inteligencia de Negocios, mediante la creación de prototipos de tableros Power BI.

Finalmente, se propone una política formal de gestión de la información con el objetivo de institucionalizar prácticas que garanticen la disponibilidad y calidad de los datos. En este sentido, se establecen una serie de lineamientos destinados a orientar el proceso y asegurar la implementación efectiva de las mejoras propuestas.

Checkland y Poulter (2020) resumen el desarrollo de SSM en siete etapas o pasos que se describen a continuación:

1. Expresar la situación problema. Se fomenta una discusión abierta acerca de la situación problemática que necesita ser abordada de manera formal.
2. Representación de la situación expresada mediante la técnica de grafico enriquecido: Se define formalmente el problema, analizando las situaciones que lo generan y las áreas de origen e impacto.
3. Constituir definiciones raíces. Se define mediante una sola oración un proceso de la organización que requiere ser transformado o cambiado. Una definición raíz debe contener tres partes: qué hacer, cómo hacerlo y por qué hacerlo, deben especificar seis elementos para profundizar su alcance y que se resumen en la sigla CATWOE. El acrónimo se define de la siguiente manera: Clientes (C); Actores (A); Transformación (T); Visión del mundo (W); Impedidores (O); Entorno (E).
4. Elaborar modelos conceptuales. Para cada definición raíz, se elaboran modelos conceptuales que representen las actividades necesarias para llevar a cabo los cambios delineados en el punto 3.
5. Comparación de modelos. Se efectúa una comparación entre los modelos creados en los pasos 2 y 4. Esto permite visualizar las diferencias y similitudes entre la situación actual y el modelo propuesto.
6. Definición de cambios factibles. El equipo de trabajo llega a un consenso para definir y proponer los cambios que deben implementarse para abordar el problema planteado inicialmente.
7. Transformaciones para mejorar la situación problemática. Se implementan los cambios propuestos en el paso 6. Este último paso se convierte en un ciclo continuo de gestión de cambios, con el objetivo de mejorar continuamente la situación inicial.

Para la implementación del AHP resulta fundamental la ejecución de las siguientes acciones (Alberto y Carignano, 2013):

1. Definir el problema, estableciendo sus componentes o elementos relevantes.
2. Estructurar la jerarquía del problema, definiendo la meta global, alternativas de decisión y criterios de selección.
3. Establecer las preferencias. Los decisores expresan sus juicios de valor mediante la utilización de matrices de comparaciones pareadas. Se emplea la escala de Saaty (2008) con valores de 1 a 9, para cuantificar la importancia relativa de los elementos.
4. Síntesis. Proporciona las prioridades relativas de las alternativas de decisión respecto a cada criterio y también las prioridades relativas de los criterios respecto al objetivo o meta global.
5. Consistencia. Para determinar la calidad de decisión final se calcula la consistencia de juicios del tomador de decisiones por medio de la relación de consistencia, cuyo su valor debe ser superior a 0,10 para indicar que los juicios emitidos son consistentes.
6. Resultado final. Se obtiene el ordenamiento o priorización global de las alternativas respecto a la meta global.

## 3. DESARROLLO

### 3.1. Diagnóstico y Análisis

La empresa bajo estudio se dedica a la fabricación de maquinaria e implementos agrícolas que inició sus actividades en la ciudad de Balcarce como una empresa familiar en 1966 y se constituyó como una Sociedad de Responsabilidad Limitada (SRL) en 2005. Su estructura organizativa está dividida en áreas funcionales como Gerencia General, Producción e Ingeniería, Administración y Finanzas, Compras y también cuenta con asesores externos. La planta cuenta con tres talleres productivos de los cuales uno está especializado en la fabricación y ensamblaje de equipos, otro es responsable del corte láser y plegado de chapas, mientras que el último se encarga del servicio de mantenimiento post venta y también ensambla diversos módulos.

Para iniciar la estructuración del problema según la SSM, se utilizaron los datos recopilados del análisis de procesos internos, de formularios de *Google* dirigidos al personal y de entrevistas con mandos

medios donde se identificaron la dinámica del fujo de información entre áreas y las principales herramientas utilizadas para su gestión. Este análisis evidenció una gestión de la información fragmentada entre áreas el empleo de una la variedad de herramientas utilizadas para la recopilación, almacenamiento y reporte de datos (*Excel, Google Forms, Project*, registros en papel, *Dropbox, Google Drive*, sistemas propios, entre otros). Como resultado, se identificaron diversas debilidades, su área de origen e impacto, las cuales se detallan en la Tabla 1. Se pudo observar que las áreas más impactadas son Compras, Planificación, y los Talleres. En este caso, el mayor número de debilidades son generadas por la Gerencia y los Talleres, mientras que las áreas Compras y Planificación, no generan debilidades.

*Tabla 1 - Matriz de debilidades, origen e impacto.*

| **Debilidades<br>Área de Origen: O - Área de Impacto: X** | | **G** | **AF** | **C** | **PI** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | **T** | **D** | **P** |
| **1** | Falta de agilidad para gestionar y documentar la información de los mantenimientos realizados | | X | X | O | | |
| **2** | Planos incompletos e información confusa para el armado de equipos y repuestos | | | | X | O | |
| **3** | Falta de definición de prioridades de trabajo y alteraciones por parte de la Gerencia | O | X | X | X | X | X |
| **4** | Falta de información técnica sobre los componentes a comprar | | | X | O | O | |
| **5** | Falta de registro de movimiento de materiales en los talleres | | | X | O | | X |
| **6** | Demoras en autorizaciones de compra | | O | X | X | | X |
| **7** | BOM (por sus siglas en inglés "*Bill Of Materials*") de equipos inexistentes, incompletos o con datos desactualizados | | | X | X | O | X |
| **8** | Falta de gestión de la información como parte de las actividades rutinarias de toda la organización | O | X | X | X | X | X |
| **9** | Ausencia de procedimientos y claridad sobre la cadena de mando | O | X | X | X | X | X |
| **10** | Falta de información en tiempo y forma de nuevas ventas, necesidades de fabricación de repuestos y de servicios post venta | O | X | X | O | | X |
| Total O / X | | 4/0 | 1/5 | 0/9 | 4/6 | 3/3 | 0/7 |
| Nota: G (Gerencia), AF (Administración y Finanzas), C (Compras), PI (Producción e Ingeniería), T (Talleres), D (Diseño) y P (Planificación). | | | | | | | |

A partir de esta instancia, y para continuar con el desarrollo de la SSM, se priorizaron las debilidades 1, 3, 8, 9 y 10. Esta selección se realizó en base al impacto en múltiples áreas, la recurrencia de los problemas detectados y el consenso alcanzado con los mandos medios durante las entrevistas. Se concluyó de forma conjunta que la mejora del proceso de mantenimiento post venta debía considerarse prioritaria dentro de esta selección. Por tal motivo, se propusieron ciertas acciones (definiciones raíces) para reducir o eliminar las debilidades existentes. Para cada una de ellas se respondieron a las preguntas: ¿Qué? ¿Cómo? y ¿Por qué? y se profundizó en el análisis CATWOE (Tablas 2 y 3).

En base a los resultados anteriores, se confeccionaron tres modelos conceptuales correspondientes a cada acción propuesta, con la finalidad de establecer la secuencia para implementar los cambios de manera efectiva. A modo de ejemplo, en la Figura 1 se presenta el modelo para el desarrollo de aplicaciones *low-code* y del tablero de *Power BI*.

*Tabla 2 - Definiciones raíces.*

| | Acciones | Qué | Cómo | Por qué |
|---|---|---|---|---|
| **1** | Incorporar un sistema digital para la documentación en tiempo real de los servicios post venta. | Digitalizar la planilla de registro que se completa una vez finalizado el servicio de mantenimiento post venta. | Mediante una aplicación *low-code* que facilite la documentación y envío de información rápida y sencilla. | Porque se requiere agilizar la confección del registro que Administración y Finanzas utiliza para la facturación. |
| **2** | Establecer una política formal que indique que la gestión de la información es una parte esencial de las operaciones. | Redactar una política formal de generación de datos. | La Gerencia redactará la política. | Porque es necesario gestionar la información para garantizar una toma de decisiones basada en datos confiables. |
| **3** | Facilitar la recopilación de datos de la fabricación de equipos mediante aplicaciones simples. | Desarrollo de una aplicación *low-code* para el registro de la información de los proyectos. | Mediante una aplicación *low-code* que facilite la documentación y el envío de información de manera rápida y sencilla. | Porque las demás áreas requieren información actualizada de los proyectos y que Planificación pueda dar seguimiento a los mismos. |
| **4** | Desarrollar un procedimiento para la gestión del servicio de mantenimiento post venta. | Elaborar un procedimiento que defina cada etapa del servicio y criterios para la recepción de solicitudes, ejecución de trabajos y documentación de tareas realizadas. | Las partes interesadas identificarán los pasos del proceso y sus puntos críticos y definirán roles y responsabilidades dentro del flujo de trabajo. | Porque se requiere reducir errores en la gestión y comunicación de la información y optimizar el uso de recursos internos. |
| **5** | Incorporar un tablero de *Power B*I para generar reportes de los proyectos y servicios post venta. | Desarrollar un tablero en *Power BI* para visualizar datos relevantes, permitiendo generar reportes dinámicos y actualizados. | Utilizando la información generada a partir de las aplicaciones *low-code* desarrolladas. | Porque desde la Gerencia se desea acceder a un resumen de los proyectos y servicios realizados. |

*Tabla 3 - CATWOE*

| | C | A | T | W | O | E |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | Planificación, Gerencia, Administración y Finanzas | Talleres | Digitalizar el registro de los servicios post venta | Agilizar el proceso de cotización y facturación del servicio | Talleres | Resistencia al cambio por parte de los talleres |
| **2** | Administración y Finanzas, Producción e Ingeniería, Compras, Gerencia | Gerencia | Transmitir la importancia de recopilar, registrar y gestionar la información | Garantizar la toma de decisiones basándose en datos confiables | Gerencia | La gestión de la información no está determinada como una cuestión estratégica |
| **3** | Planificación, Gerencia, Administración y Finanzas | Talleres | Digitalizar el registro de datos de fabricación de equipos | Garantizar la toma de decisiones basándose en datos confiables | Talleres | Resistencia al cambio por parte de los talleres |
| **4** | Planificación, Gerencia, Administración y Finanzas | Gerencia, Talleres, Planificación | Documentar y estandarizar el proceso | Reducir errores, demoras y falta de información en la atención a los clientes. | Gerencia, Talleres, Planificación | Resistencia al cambio por las partes involucradas |
| **5** | Planificación, Gerencia, Administración y Finanzas | Talleres | Incorporar la herramienta Power BI | Utilización eficiente de recursos a partir de una mejor planificación de producción | Talleres | Disponibilidad de datos organizados y actualizados para alimentar el tablero |

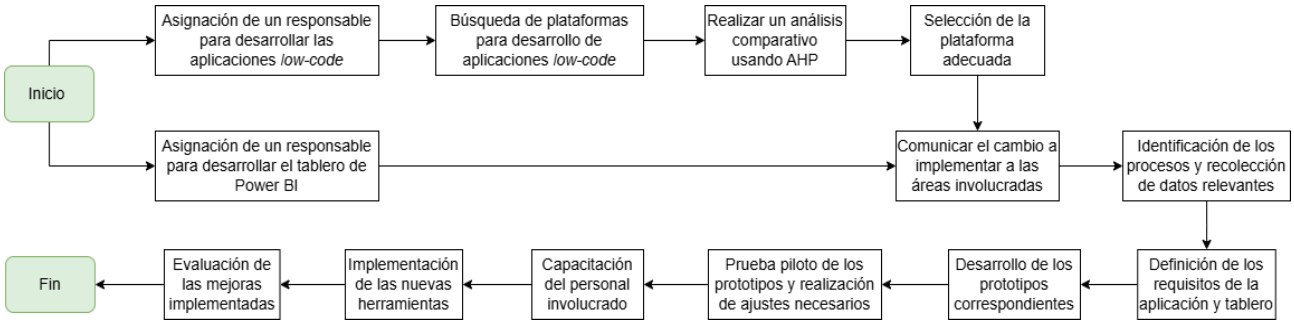



*Figura 1: Modelo conceptual para desarrollo de aplicaciones y tablero Power BI. Fuente: Elaboración propia.*

Por último, se comparó la situación actual con el modelo propuesto para mejorar el sistema de información de la organización. La implementación de aplicaciones para el registro y almacenamiento de datos garantizará la accesibilidad y actualización de la información para la toma de decisiones en todos los niveles de la empresa. Además, al procesar y presentar la información en un tablero de Power BI se facilitará el seguimiento del desempeño organizacional, proporcionando información útil para impulsar la mejora continua.

En contraste con una situación actual donde la información es inaccesible, el relevamiento de trabajos es ineficiente, las decisiones carecen de suficiente información, la gestión de la información no es prioritaria y los canales de comunicación son deficientes, el modelo propuesto busca asegurar la disponibilidad de la información, automatizar registros, facilitar la toma de decisiones informada, priorizar la gestión de la información y establecer canales de comunicación claros con responsabilidades definidas.

### 3.2. Evaluación de alternativas

En el marco de la acción propuesta para facilitar la recopilación y documentación de datos mediante herramientas digitales, se exploraron diferentes plataformas de desarrollo *low-code*, las cuales permiten crear aplicaciones con un mínimo conocimiento de programación. Las principales opciones disponibles en el mercado son *Power Apps, OutSystems, Mendix, Appian, Zoho Creator y Google AppSheet*. Con el objetivo de seleccionar la mejor plataforma para la empresa, se aplicó el AHP considerando los siguientes criterios:

- Facilidad de uso: se priorizó que la plataforma fuera simple, intuitiva y funcional, permitiendo abordar proyectos complejos sin requerir conocimientos avanzados de programación. Se asignó mayor preferencia a aquellas que resultaron más accesibles para el personal de la empresa.
- Integraciones con otras plataformas: se valoró la capacidad de integrarse con herramientas ya existentes en la organización para mantener un flujo de trabajo sin interrupciones. Se otorgó mayor ponderación a las plataformas que facilitan estas integraciones, reduciendo la duplicación de datos y la transferencia manual de información.
- Costo: se consideró fundamental que la solución ofrezca una buena relación costo-beneficio. Se priorizaron aquellas opciones que, con baja o nula inversión inicial, puedan aportar beneficios concretos a la gestión de la información.
- Velocidad de desarrollo: se otorgó mayor valor a las plataformas que permiten el desarrollo rápido de prototipos, disminuyendo la dependencia de desarrolladores especializados y facilitando iteraciones ágiles y adaptaciones rápidas.
- Escalabilidad: se valoraron positivamente las plataformas que permiten escalar las soluciones desarrolladas a medida que crece la empresa, sin comprometer el rendimiento.

A continuación, en la Figura 2 se presenta la estructura jerarquía construida para la selección de la mejor plataforma de desarrollo *low-code* para la empresa. Esta representación permite definir el problema en términos de la meta global, los criterios y las alternativas de decisión.

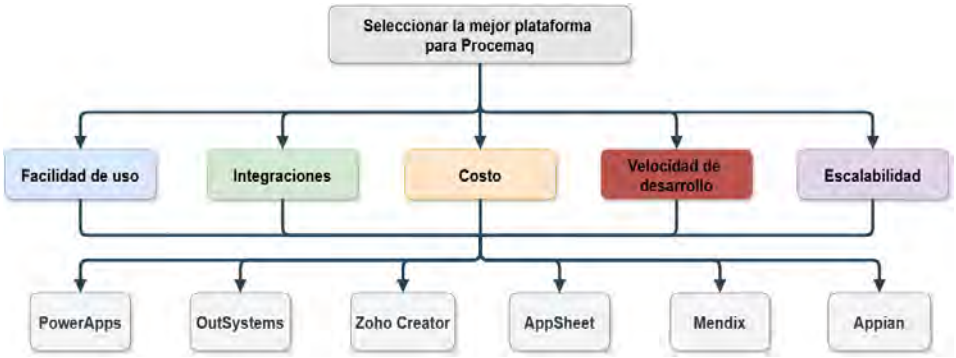



*Figura 2: Estructura jerárquica. Fuente: Elaboración propia.*

Luego, para realizar la asignación de puntajes en las comparaciones pareadas, se consideraron los criterios anteriormente definidos y datos recopilados de fuentes especializadas sobre las características, ventajas y desventajas de cada alternativa. En particular, se consultó a Capterra (s.f), una plataforma en línea que actúa como intermediaria entre compradores y proveedores de tecnología dentro de la industria del software. Este sitio asiste a los usuarios en la selección del software más adecuado según sus necesidades, a través de revisiones y evaluaciones realizadas por otros consumidores.

Dentro del análisis realizado mediante el AHP, se contempló un aspecto fundamental: la consistencia de los juicios realizados durante las comparaciones pareadas. Para su evaluación, se calculó el índice de consistencia correspondiente a cada una de las matrices. En todos los casos, los valores obtenidos fueron inferiores a 0,10, lo que indica que los juicios emitidos se consideran consistentes y válidos para la toma de decisiones.

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación del método AHP. En la primera columna se muestran las prioridades de los criterios, que representan el peso relativo asignado a cada uno de ellos según su importancia. Como se observa, el criterio con mayor importancia relativa es "Facilidad de uso", seguido por "Costo". En la segunda columna se incluye la prioridad global de cada alternativa. Si bien todas las plataformas resultan viables, este análisis permitió determinar que *Google AppSheet* es la más adecuada, al obtener la mayor prioridad global.

*Tabla 4 - Prioridad de criterios y global*

| **Prioridad de los criterios** | | **Prioridad global de las alternativas** | |
|---|---|---|---|
| **Facilidad de uso** | **0,403** | PowerApps | 0,1726 |
| Integraciones | 0,14 | OutSystems | 0,1466 |
| Costo | 0,236 | Mendix | 0,1094 |
| Velocidad de desarrollo | 0,106 | Appian | 0,1202 |
| Escalabilidad | 0,115 | Zoho Creator | 0,1719 |
| | | **Google AppSheet** | **0,2792** |

### 3.3. Propuestas de mejora

Como propuesta principal, se desarrolló un prototipo de aplicación *low-code* para el servicio de mantenimiento post venta, tomando como punto de partida el registro físico existente en papel. Con el objetivo de digitalizar y organizar la información, se replicaron los campos presentes en dicho registro en un libro de *Google Sheets*. Una vez diseñadas ambas hojas de *Google Sheet*, el siguiente paso fue vincularlas a la plataforma Google *AppSheet* y modelar cómo sería la interfaz con el usuario. La aplicación cuenta con las siguientes funciones principales:

- Crear órdenes de trabajo: permite generar nuevos registros en la base de datos.
- Editar órdenes de trabajo: brinda la posibilidad de modificar registros existentes para actualizar información según el avance del trabajo.

- Gestión de las tareas: cada orden de trabajo puede vincularse con una o más tareas específicas, lo cual permite un seguimiento detallado de las acciones realizadas.
- Notificaciones automatizadas: al finalizar una orden de trabajo, se envía automáticamente un correo electrónico con un resumen en formato PDF, también generado de forma automática desde la misma plataforma. Esta funcionalidad busca reducir drásticamente el tiempo transcurrido desde la finalización del servicio de mantenimiento hasta el proceso de facturación.
- Segmentación por estado: en la pantalla principal, las órdenes de trabajo se agrupan en tres categorías según su estado (Pendiente, En curso y Terminada), lo que facilita la gestión y priorización de actividades.

En el prototipo, las órdenes de trabajo se presentan en formato de tarjeta detallando el número de orden de trabajo, tipo de trabajo a realizar, nombre del cliente, fecha de inicio, estado de orden de trabajo y la opción de edición rápida. Al presionar sobre las tarjetas, la aplicación redirige al usuario a la vista de detalle, tal como se observa en la Figura 3.




*Figura 3: Vista de detalle Fuente: Elaboración propia.*

Dentro de esta misma aplicación, también se encuentra disponible el módulo “Proyectos” para registrar los datos referidos a la fabricación de equipos. Este módulo funciona bajo la misma lógica de funcionamiento y registro que el de mantenimiento y en este caso, la notificación automatizada es para dar aviso de la finalización de proyecto. Cabe destacar que la aplicación desarrollada en *AppSheet* es multiplataforma, es decir, puede ejecutarse tanto en dispositivos móviles (*smartphones o tablets*) como en computadoras de escritorio o portátiles. Esto permite a los usuarios interactuar con el sistema desde cualquier lugar, facilitando la carga y consulta de datos en tiempo real durante la realización de las tareas de mantenimiento y fabricación de equipos.

Por otro lado, se desarrolló el prototipo de un tablero de visualización en *Power BI* que ilustra los datos recolectados mediante la aplicación de mantenimiento (Figura 4).

Esta integración permite transformar los registros ingresados en la base de datos en información visual e interactiva, facilitando el análisis y la toma de decisiones. Esta visualización presenta distintos indicadores importantes, tales como:

- Un gráfico de barras que muestra la distribución total de horas de mantenimiento por operador.
- Un gráfico de torta que indica el estado de las órdenes de mantenimiento (finalizadas, en curso y pendientes).
- Tarjetas indicadoras de horas totales de mantenimiento y tiempo promedio de respuesta (TPR) ante una solicitud de trabajo.
- Una tabla ordenada según las órdenes de trabajo, las máquinas intervenidas y las tareas asociadas.

Para que la información utilizada en la empresa sea accesible, confiable y se mantenga actualizada, es necesario que su gestión sea reconocida como una prioridad para todos los integrantes de la organización. En el diagnóstico inicial se identificó como una debilidad que el registro de información no se considera una actividad relevante. Por ello, se propone establecer una política formal de gestión de la información, que deberá ser difundida por la Gerencia y estar disponible para todas las partes interesadas.

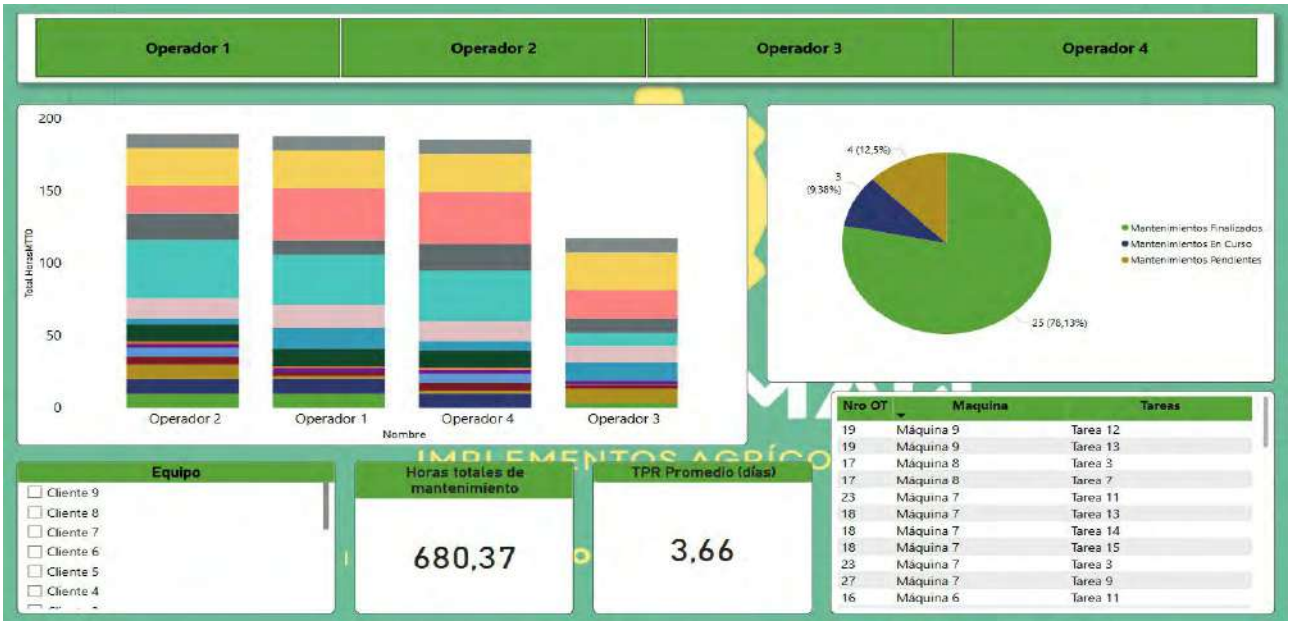



*Figura 4: Vista de detalle. Fuente: Elaboración propia*

Por último, se definieron lineamientos para el desarrollo de un procedimiento claro y estructurado que defina las etapas del servicio de mantenimiento post venta, que contemple desde la recepción de solicitudes hasta la documentación final del servicio. Esta propuesta busca estandarizar el proceso, establecer un único canal de comunicación con el cliente, reducir demoras y definir con claridad las responsabilidades de cada parte involucrada.

Con el objetivo de asegurar una adopción efectiva de las mejoras propuestas, se definen lineamientos generales que contemplan tanto los recursos necesarios como indicadores clave para evaluar su impacto:

- **Recursos necesarios:** la implementación requiere la participación activa del personal de las áreas involucradas, especialmente quienes interactúan con las aplicaciones desarrolladas y el tablero de *Power BI*. Asimismo, se deberán disponer de dispositivos tecnológicos (computadoras, *tablets* o *smartphones*) con conexión a internet para garantizar la sincronización de datos y la disponibilidad de la información para todas las partes interesadas. Por último, se contemplan recursos financieros vinculados al mantenimiento de las herramientas y la capacitación del personal.
- **Indicadores para evaluar el impacto:**
  - Tiempo promedio de emisión de la factura una vez realizado el servicio de mantenimiento post venta (TPF): es una medida de los días transcurridos entre la finalización del servicio y el envío de la factura al cliente (ver Ecuación 1).

$$TPF = \frac{\Sigma(Fecha\ de\ envío\ de\ la\ factura - fecha\ de\ finalización\ del\ servicio)}{Cantidad\ de\ órdenes\ de\ trabajo} \quad (1)$$

  - Eficiencia administrativa: la relación entre la cantidad de órdenes de trabajo procesadas y el tiempo requerido para su gestión, permite obtener una medida directa de la capacidad operativa del área administrativa, tanto antes como después de la implementación de las aplicaciones *low-code* (Ecuación 2).

$$Eficiencia\ administrativa = \frac{Órdenes\ procesadas}{Tiempo\ invertido} \quad (2)$$

- Índice de satisfacción de los empleados: para el cálculo se propone el desarrollo de encuestas de satisfacción con los siguientes aspectos: facilidad de uso de las nuevas aplicaciones; percepción de mejora en su tarea diaria; disminución de errores o retrabajos; impacto en su carga laboral. Cada aspecto deberá ser puntuado en una escala de 1 (muy insatisfecho) a 5 (muy satisfecho). El puntaje obtenido se obtendrá sumando las valoraciones de todos los aspectos evaluados por todos los encuestados. El puntaje máximo posible será el resultado de multiplicar la cantidad de preguntas por la cantidad de encuestados y por la puntuación máxima posible (5 puntos). Finalmente, el índice de satisfacción se calculará como se muestra en la Ecuación 3.

$$Indice\ de\ Satisfacción\ (\%) = \frac{Puntaje\ \ Obtenido}{Puntaje\ Máximo\ posible} x\ 100 \quad (3)$$

- Tiempo promedio de respuesta a la solicitud del cliente (TPR): es una medida aplicada al servicio de mantenimiento post venta, que evalúa la cantidad de días transcurridos entre la recepción de la solicitud de mantenimiento y la intervención efectiva en la instalación del cliente (Ecuación 4).

$$TPR = \frac{\Sigma(Fecha\ de\ intervención - fecha\ de\ solicitud)}{Cantidad\ de\ solicitudes} \quad (4)$$

En conjunto, los indicadores propuestos permiten evaluar de manera integral el impacto de las mejoras planteadas en el sistema de información. Su aplicación no solo facilita la medición de los resultados alcanzados, sino que también sienta las bases para una gestión basada en datos confiables.

## 4. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo se lograron cumplir los objetivos propuestos, orientados a abordar la problemática detectada en el sistema de información de la empresa bajo estudio. Se analizó la gestión actual de los datos, así como el flujo de información entre las distintas áreas de la empresa. Esto permitió identificar las principales debilidades en la documentación y comunicación y, posteriormente, determinar oportunidades de mejora.

La aplicación de la metodología de Investigación Operativa Soft resultó fundamental para comprender el problema desde una perspectiva sistémica y priorizar las acciones de mejora. Por su parte, la implementación del AHP facilitó la comparación de alternativas tecnológicas disponibles y permitió seleccionar, de manera fundamentada y consistente, la plataforma más adecuada a las necesidades de la organización.

Complementariamente, se diseñó un tablero interactivo en Power BI que permite centralizar y visualizar la información generada por las nuevas aplicaciones, ofreciendo a la empresa una herramienta valiosa para la toma de decisiones operativas y estratégicas. Esta visualización dinámica permitirá anticipar necesidades, evaluar resultados y fortalecer el control de los procesos.

La implementación de una política de gestión de la información contribuye a institucionalizar el valor de los datos dentro de la cultura organizacional, destacando la información como un recurso. Los lineamientos establecidos para la implementación de las mejoras propuestas contribuirán a una adopción adecuada, al contemplar los recursos necesarios, las estrategias de capacitación y los indicadores para evaluar el impacto de las herramientas incorporadas.

Finalmente, se concluye que el conjunto de mejoras propuestas representa un avance hacia la transformación digital de la empresa, alineándose con los principios de la Industria 4.0. Estas acciones no solo mejoran los procesos actuales, sino que también impulsan un cambio cultural basado en la mejora continua, la trazabilidad y la transparencia operativa. Además, crean un entorno propicio para avanzar hacia un enfoque de Inteligencia de Negocios, entendido no sólo como la incorporación de tecnología, sino como la capacidad de generar y gestionar conocimiento a partir de los datos.

## 4. REFERENCIAS.


- Alberto, C. L., y Carignano, C. E. (2013). *Apoyo Cuantitativo a las Decisiones*. Cuarta Edición. Asociación Cooperadora de la Facultad de Ciencias Económicas de la UNC.
- Anderson, D. R., Sweeney, D. J., y Williams, T. A. (2004). *Introducción a los Modelos Cuantitativos para Administración*. Grupo Editorial Iberoamericana.
- Capterra. (s.f.). *Capterra: Encuentra el software ideal para tu empresa.* https://www.capterra.com/
- Checkland, P., y Poulter, J. (2020). Soft Systems Methodology. En: Reynolds, M., Holwell, S. (Eds.), *Systems Approaches to Making Change: A Practical Guide* (p. 201-253). Springer. DOI: 10.1007/978-1-4471-7472-1_5
- Jaén García, L. F. (2019). *Fuentes de información para la investigación en Archivística y Bibliotecología*. Editorial UCR.
- Krajewski, L., Ritzman, L., y Malhotra, M. (2018). *Operations Management: Processes and Supply Chains* (11va ed.). Pearson.
- Laudon, K. C., y Laudon, J. P. (2012). *Sistemas de información gerencial* (12va ed.). Pearson.
- Minaya Vera, C. G., Oswaldo Vicente, M. V., Arias Vera, I. L., Andres Alexander, M. V., y Bravo Vera, H. F. (2022). El desarrollo Low/No-code y el futuro de los desarrolladores de software. *Minerva*, 1 (Special), (p. 21-33). DOI: 10.47460/minerva.v1iSpecial.76
- Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, 2008. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
- Tabone, L. B., Mortara, V. A., y Zanfrillo, A. I. (2019). Propuesta de un sistema de información para una institución de salud mental utilizando Investigación Operativa Soft. Comunicación presentada en *XII Simposio Internacional de Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias 2019,* Manizales [COL], 25-27 septiembre 2019.
- Valderrama, B. (2019). Transformación digital y organizaciones ágiles. *ARANDU-UTIC – Revista Científica Internacional*, 6(1), (p. 1-15). Universidad Politécnica de Madrid.
- Vega Briceño, E. A. (2005). *Los sistemas de información y su importancia para las organizaciones y empresas.* Recuperado de https://www.gestiopolis.com/sistemas-informacion-importancia-empresa/

Proyecto de Investigación Facultad de Ingeniería, Universidad del Salvador

# Título: Mejora de la autonomía de automóviles eléctricos mediante métodos inalámbricos no convencionales

# Qualification: Improving the autonomy of electric cars using non-conventional wireless methods

**Equipo de Investigación**

Juan José Grassi [1], Mario César Bonantini [2], Gabriel Biggio [3], Noguera Luciana Victoria [4], Rebecchi Cores Regina María [5]

**Resumen:** Un automóvil eléctrico, con características de equipamiento y prestación equivalentes a las de un modelo similar de combustión interna, debería estar dotado de un sistema de baterías cuyo peso hoy excedería los 3000 kg. El fuerte impacto que esto implica sobre la estructura y performance del vehículo ha forzado a la mayoría de las automotrices a optar por disminuir drásticamente ese valor a expensas de sacrificar autonomía. Este trabajo propone evaluar las distintas alternativas de recarga del sistema acumulador de energía de estos automóviles, minimizando el tiempo de detención. Además, analiza otras fuentes de suministro de energía, y evalúa diferentes métodos existentes de carga, con sus respectivos beneficios, incorporando inventivas que aún no han sido implementadas y pueden impactar notoriamente en el tiempo y rendimiento energético que requiere la carga de estos vehículos.

**Palabras-clave:** Radiación energética; electromovilidad; nanotecnología; celdas fotovoltaicas.

**Abstract:** An electric car, with equipment and performance characteristics equivalent to those of a similar internal combustion model, should be equipped with a battery system whose weight today would exceed 3000 kg. The strong impact that this implies on the structure and performance of the vehicle has forced most car manufacturers to opt for drastically reducing this value at the expense of sacrificing autonomy. This paper propose to evaluate the different alternatives for recharging the energy storage system of these cars, minimizing the downtime. It also analyze other sources of energy supply, and assesses the various existing charging methods, with their respective benefits, incorporating inventions that we consider have not yet been implemented and can significantly impact the time and energy performance required to charge these vehicles.

**Keywords:** Energy radiation; electromobility; nanotechnology; photovoltaic cells.

## 1. Introducción

La energía eléctrica necesaria para el transporte representa un desafío significativo para la ingeniería, especialmente en el ámbito del transporte de personas mediante vehículos eléctricos EV[1] de uso ciudadano. Con el objetivo de lograr mayor autonomía y reducir los tiempos de recarga, se han desarrollado diversos tipos de acumuladores de energía, como baterías y súper-capacitores.

En ciertos casos, para evitar el uso de estos costosos acumuladores, se han implementado soluciones alternativas para el transporte de carga o pasajeros. Entre éstas destacan los sistemas de alimentación eléctrica directa a los motores, utilizando "*trolleys"* o vías electrificadas en trayectos específicos.

Estas soluciones permiten el uso de electricidad como fuente de energía limpia y sustentable, dependiendo de su origen, eliminando en muchos casos la dependencia de los hidrocarburos.

[1] EV: *Electric Vehicles* (Vehículos Eléctricos).

Estos acumuladores han impuesto un sistema de mantenimiento y elaboración que, en ocasiones, se ha tornado bastante oneroso.

## 2. Objet0 principal

El principal objeto de este trabajo es contribuir al aumento de la autonomía de los EV y reducir el tiempo de carga sin el uso de energías tradicionales, aprovechando energías que están presentes y pueden colaborar con la autonomía.

La eliminación de todo tipo de conexión alámbrica permite desarrollar sistemas de conectividad que les permitirá a los EV desplazarse con mayor libertad utilizando recursos existentes, abundantes y a nuestro alcance, que actualmente se encuentran desaprovechados.

Se podría comparar esto con el tratamiento de los residuos, donde muchos de ellos son directamente desechados sin tener en cuenta su aptitud para ser reciclados y posteriormente reutilizados.

Mirando hacia el futuro, es posible que nuestras fuentes de energía deban reducirse y quizás ya no sean viables como fuentes principales. En un contexto global que busca optimizar recursos, nos veremos obligados a reducir drásticamente el uso de tales fuentes mediante su reemplazo por otras basadas en nuevas tecnologías.

### 2.1. Objetivos específicos

1. Por medio de la carga inalámbrica de las baterías, se puede extender la autonomía de los vehículos eléctricos y al mismo tiempo reducir el tiempo de carga en las estaciones.
2. Las baterías de los EV, pueden recargarse mediante energía inalámbrica proveniente de energías dispersas de las redes de transmisión y distribución eléctrica.

## 3. Hipótesis general

Por medio de investigaciones realizadas en la comunidad científica, se evaluarán las diferentes alternativas de energías que, estando a nuestro alcance, pueden ser aprovechadas por nuestros EV aumentando su autonomía. Basándonos en datos de información empírica recogidos en sitios adecuados del AMBA[2], procuramos detectar y evaluar las posibilidades de recuperar energías perdidas para darles como uso, el aporte de carga a las baterías de estos vehículos.

### 3.1. Hipótesis particulares

1. Existen varios métodos por los cuales se puede obtener energía sin requerir conectividad y su utilización puede colaborar para aumentar la autonomía de los EV.
2. La energía electromagnética que se pierde en las redes de transmisión y distribución eléctricas se puede capturar desde los vehículos mientras circulan o detenidos por medio de transductores[3] adecuados y así cargar sus baterías extendiendo su autonomía.

## 4. Referencias conceptuales

Nuestro principal desafío de mejorar la autonomía de los vehículos eléctricos, es hacerla comparable con la de sus predecesores: los tradicionales automóviles con motor de combustión interna.

Dada la baja participación actual de estos nuevos vehículos en el parque automotor argentino, es razonable esperar que la adaptación de la infraestructura necesaria para garantizar la libre circulación por todo el país, incluyendo una amplia disponibilidad de puntos de recarga, tome todavía algunos años.

Para contrarrestar esta limitación, propia de los automóviles eléctricos, la Empresa Tesla[6] ha tomado la iniciativa de instalar 45.000 estaciones de recarga en los Estados Unidos, distribuidas

[2] AMBA: Área Metropolitana Buenos Aires
[3] Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra.

estratégicamente para asegurar que los propietarios de sus vehículos tengan asegurado el reaprovisionamiento de energía, cualquiera que fuera el trayecto a cubrir.

Actualmente, EE. UU. cuenta con 188.600 puertos de carga (públicos y privados) y 67.900 estaciones de carga, según cifras del Departamento de Energía de EE. UU.

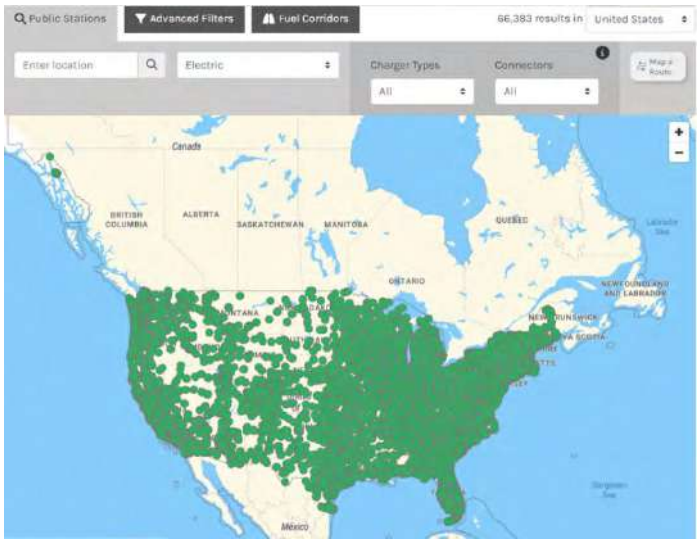



Figura 1: Relevamiento de puntos de reaprovisionamiento de energía eléctrica en EE. UU.[7]

En el hipotético caso que se pretendiera reemplazar completamente el parque de vehículos convencionales por misma cantidad de vehículos eléctricos, un estudio de Coltura[8], organización sin fines de lucro dedicada al estudio del consumo de combustibles, da cuenta de que sería necesario sextuplicar la cantidad de puntos de recarga, lo que representa un importante desafío.

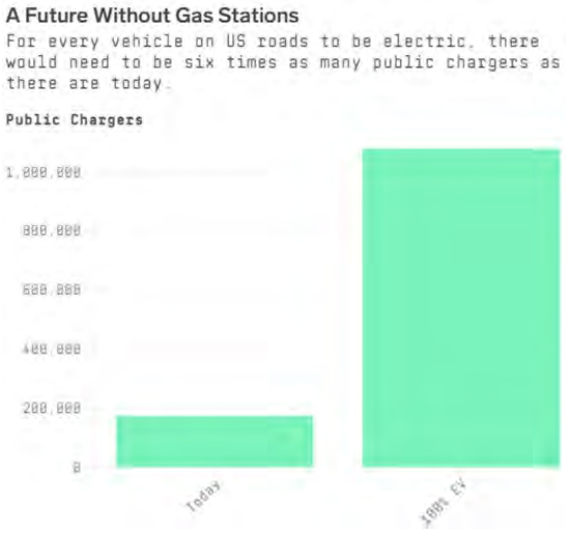



Figura 2: Estimación de puntos de recarga de vehículos eléctricos hacia el año 2040. Fuente: Coltura

En cuanto a la infraestructura actual para el reaprovisionamiento de combustible, ese país dispone de unas 145.000 gasolineras, según el Instituto Estadounidense del Petróleo.




Figura 3: Información geoespacial obtenida por x Map [9]

En Argentina las cosas son un poco distintas, ya que las inversiones en materia de infraestructura están ligadas no sólo a políticas estratégicas sino también a créditos internacionales no siempre disponibles, que, además, suelen no ser lo suficientemente ágiles como para acompañar un eventual desembarco masivo de esta nueva tecnología en el país.

Un último relevamiento llevado a cabo por este equipo de investigación, da cuenta de que en Argentina hay 73 estaciones de recarga que totalizan 141 puestos (información a octubre 2023). Más aún, de acuerdo con la información obtenida, no se puede garantizar que todos ellos se encuentren operativos.

| Provincia / Ciudad | Estaciones | Puntos de Recarga |
|---|---|---|
| **Buenos Aires** | **36** | **66** |
| Avellaneda | 3 | 6 |
| Campana | 1 | 2 |
| Dalreaux | 1 | 1 |
| Ezeiza | 1 | 1 |
| Flores | 1 | 1 |
| Hudson | 1 | 1 |
| La Plata | 1 | 1 |
| Liniers | 1 | 3 |
| Malvinas Argentinas | 1 | 1 |
| Mar del Plata | 1 | 1 |
| Pilar | 4 | 5 |
| Pinamar | 1 | 1 |
| Pompeya | 1 | 1 |
| San Clemente del Tuyu | 1 | 3 |
| San Isidro | 3 | 4 |
| Tigre | 1 | 8 |
| Wilde | 1 | 3 |
| Vicente López | 2 | 2 |
| San Martín | 2 | 2 |
| Chascomús | 1 | 1 |
| Boulogne | 2 | 6 |
| CABA | 4 | 11 |
| El Talar | 1 | 1 |
| **Chubut** | **2** | **4** |
| Puerto Madryn | 2 | 4 |
| **Córdoba** | **9** | **17** |
| Alta Gracia | 1 | 1 |
| Carlos Paz | 1 | 1 |
| Córdoba | 3 | 9 |
| La Calera | 1 | 2 |
| La Tablada | 1 | 2 |
| Río Cuarto | 1 | 2 |
| Villa María | 1 | 0 |
| **San Juan** | **1** | **4** |
| Los Palacios | 1 | 4 |
| **Santa Cruz** | **7** | **14** |
| Bajo Caracoles | 1 | 2 |
| El Calafate | 1 | 2 |
| Gobernador Gregores | 1 | 1 |
| Perito Moreno | 1 | 2 |
| Tres Lagos | 1 | 2 |
| El Chaltén | 1 | 3 |
| La Leona | 1 | 2 |
| **Santa Fe** | **8** | **19** |
| Granadero Baigorria | 1 | 6 |
| Rosario | 7 | 13 |
| **Tierra del Fuego** | **7** | **8** |
| Río Grande | 4 | 4 |
| Tolhuil | 1 | 2 |
| Ushuaia | 2 | 2 |
| **Tucumán** | **2** | **6** |
| San Miguel de Tucumán | 1 | 2 |
| Yerba Buena | 1 | 4 |
| **Neuquén** | **1** | **3** |
| San Juan | 1 | 3 |
| **Total general** | **73** | **141** |

Figura 4: Puntos de carga de EV en la Argentina.

Si se lograran captar algunos kWh adicionales de diversas fuentes de energía durante el uso habitual del vehículo, se cumplirían tres objetivos fundamentales: incrementar la autonomía de los vehículos,

reducir la criticidad de la escasez de puntos de recarga, y disminuir el tamaño y/o la cantidad de baterías, el componente más caro y el más nocivo para el medio ambiente.

## 5. Análisis de alternativas

Así las cosas, este trabajo busca investigar algunas líneas de mejora de la autonomía a partir de estrategias de recarga de energía que no requieran inversiones exorbitantes en infraestructura y que, además, puedan permitir el reaprovisionamiento energético *sin necesidad de detener la marcha durante mucho tiempo*, otra gran debilidad de estos automóviles.

Sin perjuicio de que puedan existir otras fuentes de suministro de energía, que también serán oportunamente analizadas, algunas de las posibilidades previsualizadas y pasibles de ser investigadas son:

### 5.1. Recarga por Energía solar

Aprovechando esta importante fuente natural, su energía podría ser captada por paneles solares flexibles, ubicados en las superficies del auto expuestas a la radiación solar en el techo; el capot y eventualmente, en el baúl, de manera que no alteren el diseño original del vehículo.

Esta fuente de energía adicional consiste en el agregado de paneles solares flexibles sobre las caras superiores de la carrocería del vehículo, por supuesto, en tanto su diseño lo permita.

Dadas sus características, tales como peso, tamaño y facilidad de adaptación a distintos requerimientos, este tipo de paneles está particularmente recomendado para suministrar energía eléctrica a sistemas de potencia de elementos móviles, como, por ejemplo; embarcaciones, casas rodantes, vehículos recreativos y cualquier otro dispositivo que requiera fácil y práctico montaje, desmontaje y traslado del sistema.

La flexibilidad de estos paneles proporciona la adaptabilidad necesaria a superficies curvas, como las que caracterizan a los automóviles que nos ocupan. En la Figura 5, se puede observar un ejemplo de montaje de un panel de este tipo sobre el techo de un vehículo eléctrico.



Figura 5: Ejemplo de montaje[10]

El aporte de energía de este sistema al sistema de baterías estará fuertemente ligado no sólo a la claridad del espacio aéreo (incidencia directa del sol), sino también al tiempo de exposición. Probablemente no sea muy contributivo en espacios urbanos y/o durante períodos de uso reducidos, pero sí ganará eficiencia en trayectos largos sobre rutas, naturalmente despejadas, y durante períodos prolongados.

A modo de ejemplo, se desarrollará un análisis cualitativo de lo que podría ser el aporte de energía de un panel de este tipo a un sistema acumulador de energía eléctrica.

El dato de partida será la curva característica Corriente-Tensión del panel. El caso ilustrado en la Figura 6, está referenciado a condiciones ambientales óptimas, con un nivel de irradiación solar de 1000 W/m$^2$.

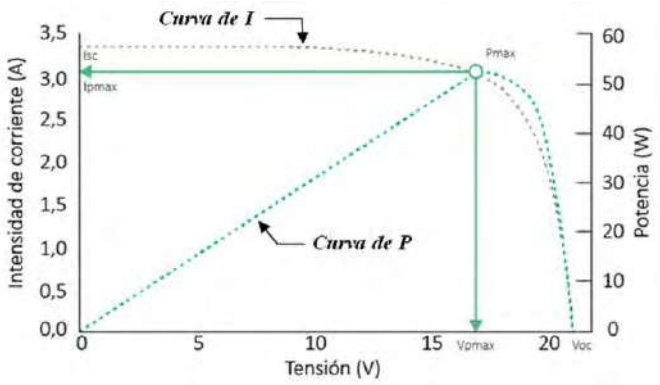



Figura 6: Gráfico de Intensidad en fusión de la Tensión y Potencia

La intensidad de la corriente al inicio de la curva es la que se corresponde con el estado de cortocircuito (V = 0), mientras que al final de ésta podemos apreciar el estado del panel a circuito abierto (I = 0). Cualquier estado intermedio representa el comportamiento eléctrico del panel para un estado de tensión específico. En nuestro caso dicho estado quedará establecido por el regulador de tensión, que, a su vez, estará configurado de manera acorde a la tensión máxima admitida por el sistema de baterías. En dicho estado tendremos una disponibilidad de potencia que resultará del producto de la intersección de las dos rectas correspondientes a la tensión fijada y a la intensidad de la corriente obtenida a partir de ella. Este valor es el que queda definido en el gráfico por Ipmax y Vpmax.

En todo proceso vinculado a una transformación energética, un dato de particular relevancia termina siendo su eficiencia. Si bien los motores eléctricos utilizados en estos vehículos suelen tener rendimientos realmente buenos (superiores al 90%), cuando se habla de transformación fotovoltaica rara vez se pueda superar el 25%. Por supuesto que esto no representa un problema desde lo económico, dado que el recurso original (radiación solar) es totalmente gratuito; pero sí lo es a la hora del dimensionamiento del sistema. El propio Elon Musk, director general de Tesla, Inc., dijo hace algunos años: *el lugar más ineficiente para el aprovechamiento de la energía solar son los automóviles*. No obstante, actualmente su empresa ha comenzado a realizar experimentos en este sentido.

Varios han sido los fabricantes de autos eléctricos que han evaluado la posibilidad de incorporar paneles eléctricos en sus vehículos. A continuación, detallaremos algunos ejemplos conocidos:

### 5.1.1. Proyecto Sion

Sion supo ser un proyecto de auto solar de "*Sono Motors*". Se trataba de un automóvil de aspecto general y dimensiones muy similares a cualquier otro vehículo de gama media, equipado con un motor de 120 kW de potencia que permitiría desarrollar una velocidad máxima de 140 km/h. Contaba con un sistema de baterías de 54 kWh, lo que garantizaría una autonomía de poco más de 300 km. Su carrocería estaba completamente cubierta por paneles solares que, según la propia empresa alemana "*Sono Motors*", permitirían incrementar su autonomía en unos 112 kilómetros.



Figura 7: Automóvil Sión. Fuente: El Español

Con un costo aproximado inferior a los €30.000, este vehículo asomaba como una gran opción de relativo bajo costo, pero luego de 3 años de tareas relacionadas con el diseño, a fines de 2022 las necesidades financieras de la Compañía impulsora llevaron a abortar el proyecto, por lo cual no se ha logrado fabricar ni siquiera una unidad de este modelo.

### 5.1.2. Proyecto *Lightyear one*

Este es otro proyecto de los llamados “autos solares” que terminó muriendo sin llegar a transitar la línea de producción seriada.

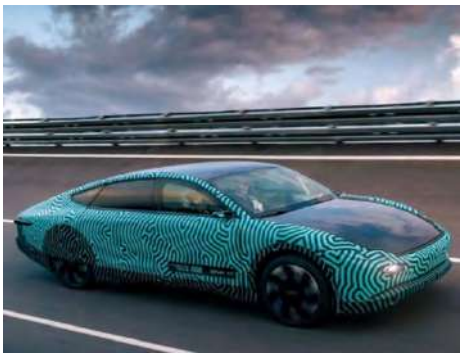


Figura 8: Lightyear One. Fuente: El Español.

El inicio de su desarrollo data de 2017, llegando a la etapa de prototipo un par de años después. Sin muchas explicaciones, la empresa, subsidiaria de la holandesa Atlas Technologies BV, termina dando por terminado el proyecto y comienza a trabajar sobre su evolución, el *Lightyear Two*[11]. Tampoco está muy claro el futuro de este modelo, aunque todo parece indicar que las ecuaciones financieras que sustentaron su lanzamiento no resultaron lo suficientemente acordes a los requerimientos del proyecto.

### 5.1.3. Proyecto *Aptera*

Asoma casi como el único proyecto con posibilidades de progresar, al menos en lo que refiere a los planes de la Compañía *Aptera Motors*.

Se trata de un biplaza construido con materiales ultraligeros, lo que contribuye a un mejor aprovechamiento energético.



Figura 9: Prototipo Aptera. Fuente: El Español.

Si bien su diseño no está alineado con lo que uno acostumbra a ver en las calles, sus desarrolladores transforman este aspecto en una de sus principales fortalezas, argumentando que su diseño aerodinámico contribuye a la optimización del consumo energético. Tal es así que se augura una autonomía de más de 640 km (se llegó a hablar, incluso, de hasta 1000 km), a los que deberían agregarse unos 64 km adicionales concedidos por los paneles solares que lo recubren. Si bien no está debidamente explicitado en la ficha técnica, se entiende que estos km adicionales son por semana, es decir, capitalizando la radiación solar a lo largo de 7 días.

### 5.2. Recarga de baterías por Energías Telúricas

El aprovechamiento de este tipo de energía ya fue motivo de estudio por parte de este equipo de investigación, dando origen a publicaciones en diversos ámbitos de divulgación científica bajo el título: *Aprovechamiento Energético de las Corrientes Telúricas* [12].

En dicho trabajo se ha podido comprobar la existencia de flujos de cargas eléctricas ya sea por encima como por debajo de la corteza terrestre. Las primeras son originadas por las partículas de aire que naturalmente portan una cierta cantidad de carga eléctrica y son trasladadas con ayuda de los vientos. Valiéndonos de un aro metálico con buena permeabilidad magnética y bobinado, montado con su eje transversal paralelo al suelo, se ha logrado verificar la inducción en dicho bobinado de fuerzas electromotrices de magnitud variable.

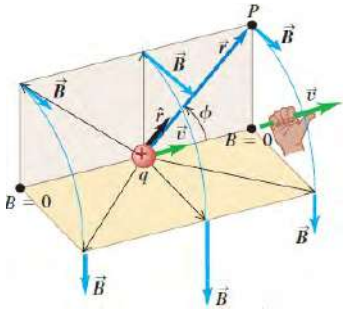



Figura 10: Campo magnético “B” producido por una carga en movimiento.

El campo magnético “*B*” es aquel constituido por las líneas de campo magnético que conforman el flujo magnético engendrado por cada una de las espiras de la bobina de nuestro aro de estudio.

Diversos experimentos realizados siglos atrás, terminan dando cuenta del relacionamiento de todos los factores incidentes a través de la expresión:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{|q||v| sen\varphi}{r^2} \qquad (1)$$

Donde "*q*" es la cantidad de carga eléctrica que porta la partícula en cuestión, "*v*" es la velocidad a la que se traslada y "*φ*" el ángulo instantáneo que forman los vectores $\overline{v}$ y $\overline{r}$.

La constante de proporcionalidad que relaciona a los factores intervinientes es $\mu_0/4\pi$, siendo $\mu_0$ la constante de permeabilidad magnética del vacío[4]. La determinación de esta constante escapa al objeto del presente trabajo.

De aquí surge una conclusión muy importante: la sola presencia de una carga eléctrica no implica la generación por parte de ella de un campo magnético. Para que esto último ocurra, la carga debe estar en movimiento y, además, el punto donde se quiere determinar el valor del campo magnético no debe estar ubicado sobre la trayectoria, ya que, en tal caso, $sen\,\varphi$ sería igual a cero y por lo tanto $B = 0$.

Analizando vectorialmente esta expresión vemos que también puede ser asimilada como el producto vectorial de los vectores velocidad $\vec{v}$ y posición $\vec{r}$, con lo cual podríamos expresarla de la siguiente manera:

$$\overline{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{q\overline{v} \times \overline{r}}{r^2} \qquad (2)$$

El campo magnético queda evidenciado a través de una cantidad infinita de líneas de campo, las que al atravesar una determinada superficie conforman el conocido flujo magnético $\Phi$ .

Y acá es donde volvemos a estar ante un fenómeno físico, ya descrito con anterioridad, que es el "*fenómeno de inducción electromagnética*"; y que queda definido a través de la Ley de Faraday como:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -A\frac{dB}{dt} \qquad (3)$$

siendo "A" la superficie del área encerrada por cada espira bobinada en torno del aro experimental.

La Ley de Faraday (1867) establece que "la fuerza electromotriz inducida en un circuito cerrado es igual al opuesto de la tasa de cambio del flujo magnético en el tiempo".

La expresión anterior está referida a un circuito conformado por una sola espira. En caso de contar con "*N*" espiras, entonces esta expresión debe ser afectada por el factor "*N*", ya que el flujo magnético estaría siendo abrazado *N* veces y cada una de las espiras estaría dando lugar a la inducción de una fuerza electromotriz en sí misma. Si consideramos a todo el bobinado como una sucesión de *N* espiras conectadas en serie, la fuerza electromotriz total inducida en todo el arrollamiento resultará:

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot A\frac{dB}{dt} \qquad (4)$$

Dijimos que una carga eléctrica da lugar a la generación de un campo magnético en su entorno si y sólo si dicha carga está en movimiento, lo cual constituye una condición necesaria. Pero Faraday establece una nueva condición para que ese campo magnético contribuya a la inducción de una fuerza electromotriz y es que dicho campo sea variable en el tiempo, ya que en caso de ser constante (como consecuencia de ello también lo será el flujo magnético), la derivada anterior será nula.

## 6. Recarga de baterías por inducción de pérdidas en redes de distribución

Se podría hacer extensivo lo visto en el punto anterior a aquellas zonas del automóvil que se encuentren sometidas a diversos flujos de aire de manera permanente durante su traslado.

[4] Si bien se hace referencia a la permeabilidad magnética del vacío, vale aclarar que al trabajar en el medio "aire", el error introducido como consecuencia de tomar la permeabilidad magnética relativa del aire en lugar de la del vacío, sería excesivamente pequeño y despreciable.



Figura 10: Zonas probables para el montaje de bobinas telúricas. Fuente Propia

Por ejemplo, podrían imaginarse los espacios debajo de los guardabarros y todo el borde periférico interior debajo del capot delantero, cubiertos con pseudos toroides de alta permeabilidad magnética y bobinados. Estos elementos aprovecharían las corrientes de aire generadas mientras el vehículo está en movimiento, contribuyendo así a la carga del sistema de baterías mediante la captación de energía telúrica.

Estos efectos pueden ser cuantificados, según los parámetros de un inductor magnético tales como la cantidad, tamaño y longitud de las espiras y permeabilidad que dependerá de la ubicación de las diferentes bobinas, y su compactado en las diferentes zonas del vehículo.

De acuerdo con experiencias realizadas en nuestro trabajo anterior denominado *"Aprovechamiento energético de las corrientes telúricas"*, por medio de un aro aislado del tipo bobina de Rogowski[13], con los parámetros indicados en la tabla que se muestra a continuación, hemos obtenido 630 mV inducidos, lo que demuestra la transferencia energética del viento al sistema de captación.

| Diámetro del aro (mm) | Sección del aro ($mm^2$) | Permeabilidad magnética (Hy/m) | Espiras | Velocidad del viento (km/h) | FEM (mV) |
|---|---|---|---|---|---|
| 450 | 120,96 | 0,00025 | 3200 | 6 | 630 |

Figura 11: Tabla ponderativa de medición de tensiones inducidas por el aire. Fuente Propia.

Como consecuencia inmediata de lo explicitado más arriba, esa masa de aire (o conjunto de cargas eléctricas) que circula por el interior del aro; además de provocar el *efecto triboeléctrico*[14] y ser la responsable de la formación de las tormentas eléctricas, da lugar a la inducción de una fuerza electromotriz en su arrollamiento.

En los automóviles son esperables valores muy superiores de fuerzas electromotrices debido a las velocidades desarrolladas. Éstas, básicamente, son tensiones alternas funcionales a la variación de esas cargas dentro del inductor.

Cabe recordar que el presente trabajo está enfocado a la factibilidad teórica del aprovechamiento energético de distintas fuentes hasta hoy desaprovechadas como tales. Por supuesto que el tema no se agota aquí y, a fin de proceder a su implementación definitiva, será imprescindible realizar una evaluación exhaustiva del comportamiento de todo este sistema de captación en lo que refiere a su compatibilidad electromagnética (EMC) y a eventuales interferencias electromagnéticas (EMI). Dicha evaluación no estuvo comprendida dentro de los alcances de este trabajo, quedando la misma asociada a una próxima investigación centrada específicamente en la implementación de los dispositivos descriptos.

### 6.1. Recarga por inducción

Se sabe que uno de los grandes desafíos que impone una línea de transmisión de alta tensión es la minimización de sus pérdidas, individualizadas básicamente como potencia activa consumida por los

conductores debido a su pequeña, pero siempre presente resistencia eléctrica, y potencia reactiva irradiada al espacio circundante producto de las corrientes que circulan por ellos.

Esto impone la inquietud de explorar aún más esta iniciativa, yendo a buscar esta energía irradiada por las líneas de alta tensión, que corren a la vera de rutas y caminos, y captarla con un grado de eficiencia óptimo para su posterior utilización.

Nos proponemos captar estos campos magnéticos con inductores y aprovechar la tensión inducida en ellos para aportar carga al sistema de baterías. Es decir, transformar pérdidas de las líneas de AT en energía útil para estos vehículos.

Luego de haber recorrido diferentes rutas dentro de la provincia de Buenos Aires, se ha podido medir tanto el campo eléctrico inducido como así también el campo magnético, lo que nos llevó a realizar un cálculo de estimación de tensión que podría generarse y de la energía que se puede percibir en una simple inductancia.

### 6.1.1. Adquisición de datos

Para verificar los conceptos esbozados anteriormente, se han realizado diferentes mediciones en regiones del conurbano de Buenos Aires. Se detallan a continuación las más significativas, dado que no están alteradas por interferencias de campos electromagnéticos provenientes de otras fuentes.

Resumimos el trabajo realizado en dos regiones:

1. Ciudad de Campana
2. Ciudad de Cardales

Ambas regiones están atravesadas por líneas de alta tensión pertenecientes al Sistema Argentino de Interconexión (SADI), administrado en este momento por la empresa Cammesa[15]. Son redes importantes que atraviesan la ruta y provienen del complejo termonuclear de Atucha I y II.

Esa ruta es atravesada por redes de 132 kV y 500 kV y en esos sectores, con un instrumental elemental, se han obtenido muy buenas mediciones.

Las mediciones fueron realizadas con un medidor de campo magnético y de campo eléctrico, el que nos informa las magnitudes de ambos parámetros con un margen de error del 1,7% según indicación del fabricante, Benetech[16].



Figura 13: Equipo Benetech sobre vehículo, testeando valores de campo. Fuente Propia.

En la Figura 14 se presentan los diversos puntos de observación y toma de los valores que permiten realizar los cálculos de energía derivados de los fenómenos de inducción.

Éstas son esenciales para validar nuestro proyecto sobre la generación de fuerza electromotriz inducida en los vehículos para mejorar su autonomía, lo cual se verifica al observar que los vehículos capturan esta energía y recargan sus baterías.

Esta evidencia confirma la hipótesis y afirmamos que es posible aumentar la autonomía de las unidades mediante la recarga inalámbrica.

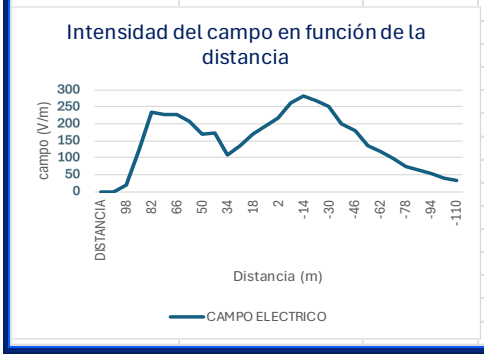
### 6.1.2. Mediciones realizadas en las zonas elegidas para este trabajo

| MEDICIONES TORRE DE 132 kV, S/ubicación detallada, localidad Campana | | MEDICIONES TORRE DE 500 kV, S/ubicación detallada, localidad Cardales |
|---|---|---|
| Las distancias de las líneas de 132kV son aproximadamente de 4m entre fase | | Las distancias de las líneas de 500kV son aproximadamente de 10m entre fase |
| La altura que poseen promedio éstas líneas de transmisión de AT, son de 4,5m | | La altura que poseen promedio éstas líneas de transmisión de AT, son de 4,5m |
|  | |  |

Figura 14: Zonas donde se efectuaron las mediciones. Fuente: propia

### 6.1.3. Valoración de las mediciones de campos en las regiones

| Campana | | | Cardales | | |
|---|---|---|---|---|---|
| CAMPO MAGNÉTICO | CAMPO ELECTRICO | DISTANCIA | CAMPO MAGNÉTICO | CAMPO ELECTRICO | DISTANCIA |
| µT | V/m | m | µT | V/m | m |
| 0 | 20 | 98 | 0 | 22 | 98 |
| 0 | 120 | 90 | 0 | 28 | 90 |
| 0 | 234 | 82 | 1 | 46 | 82 |
| 0 | 228 | 74 | 3 | 49 | 74 |
| 0 | 226 | 66 | 6 | 120 | 66 |
| 0 | 208 | 58 | 21 | 132 | 58 |
| 0 | 171 | 50 | 17 | 134 | 50 |
| 0 | 174 | 42 | 43 | 196 | 42 |
| 0 | 107 | 34 | 51 | 208 | 34 |
| 0 | 135 | 26 | 96 | 305 | 26 |
| 0 | 168 | 18 | 122 | 323 | 18 |
| 0 | 194 | 10 | 287 | 509 | 10 |
| 0 | 217 | 2 | 449 | 649 | 2 |
| 0 | 262 | -6 | 296 | 515 | -6 |
| 0 | 281 | -14 | 296 | 629 | -14 |
| 0 | 270 | -22 | 412 | 691 | -22 |
| 0 | 251 | -30 | 350 | 581 | -30 |
| 0 | 200 | -38 | 353 | 593 | -38 |
| 0 | 179 | -46 | 421 | 664 | -46 |
| 0 | 135 | -54 | 367 | 657 | -54 |
| 0 | 117 | -62 | 398 | 593 | -62 |
| 0 | 97 | -70 | 190 | 452 | -70 |
| 0 | 73 | -78 | 77 | 304 | -78 |
| 0 | 64 | -86 | 49 | 239 | -86 |
| 0 | 52 | -94 | 26 | 181 | -94 |
| 0 | 41 | -102 | 2 | 134 | -102 |
| 0 | 32 | -110 | 4 | 0 | -110 |



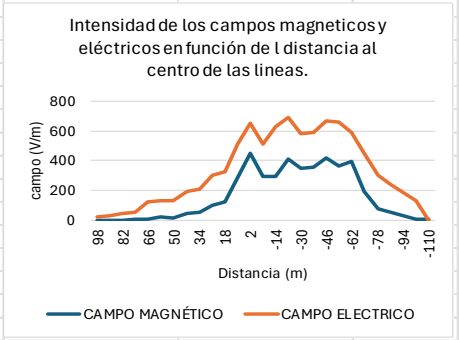




Figura 15: Valoración de mediciones en zonas elegidas. Fuente Propia

Se puede observar en las mediciones expuestas en la Figura 15 la variación tanto del campo eléctrico como del campo magnético. En una de las zonas se detectó la presencia de campo eléctrico solamente, y esto nos lleva a realizar la siguiente inferencia, bastante aceptable:

El campo eléctrico, es generado por la presencia de cargas eléctricas y, en este caso, variables o alternativas con una frecuencia de 50 Hz, lo cual se manifiesta por la diferencia de potencial de la red, y en ambas mediciones está presente, aunque con valores diferentes tanto por las distancias, como por las mismas tensiones de línea presentes en las torres: un caso de 132 kV y el otro de 500 kV.

El campo magnético que percibimos, y que también está presente en toda la red, es proporcional a la intensidad de la corriente que circula por las líneas de transmisión y, por lo tanto, también de la manifestación del estado de carga que la misma posee.

En la localidad de Campana, las mediciones se llevaron a cabo durante un día feriado. Podríamos entonces inferir con un importante grado de confianza que, por tratarse de una red industrial, el estado de carga de dicha red era escaso, por lo que el campo magnético no llegó a ser detectado por el instrumento de medición.

No ocurrió así en la localidad de Cardales, donde, por tratarse de un ramal de 500 kV de la red del SADI, el nivel de carga es más constante.

### 6.1.4. Captura de la Energía irradiada por las torres

A partir de la presencia de las inducciones manifestadas en la Figura 15, resulta necesario diseñar sistemas de captura de la energía presente, para lo cual se requieren inductancias, según explica Mujal Rosas[17] en su estudio de redes de transmisión y sus pérdidas. La valoración de las potencias que surgen de dichas inducciones se fundamenta en los aspectos teóricos explicitados en el Punto 5.2 de este trabajo, por lo que haremos unas consideraciones que, de alguna manera, nos permitan concluir con algunos datos interesantes.

En principio se alojará un inductor en algún lugar oculto del automóvil. Sólo a modo ilustrativo, se ha elegido un Renault Kwid, debajo de cuyo capot y debidamente oculto se ubicará el bobinado, marcado en la siguiente Figura con línea roja, repitiendo el esquema teórico desarrollado en el Punto 5.2:




Figura 16: Zona elegida para el bobinado.

Una vez más, es necesario recordar lo señalado en el Punto **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de este documento respecto de las EMC y EMI.

### 6.1.5. Inductancia del posible bobinado en el capot de un Renault Kwid

Lo primero que se necesita es calcular la FEM[5] inducida por esta bobina. Para ello hacemos algunas aproximaciones de los parámetros.

Consideramos que el capot posee un bobinado en su contorno, el que captura líneas de campo provenientes de las redes de trasmisión eléctricas como las señaladas anteriormente.

- **Cálculo del valor de la inductancia**

Para ese cálculo, y considerando una arquitectura rectangular redondeada en las esquinas, aproximaremos el cálculo al de la bobina toroidal[18], cuyo valor de inductancia es determinable por medio de la siguiente expresión:

[5] Con las siglas FEM se identifica a la Fuerza Electromotriz, que surge a partir de la ley de Faraday-Lenz.

$$\mathbf{L\ (H)} = \frac{\boldsymbol{\mu}.\mathbf{N^2}.\mathbf{A}}{\mathbf{l}} \qquad (5)$$

Donde:

L es la inductancia y se mide en Henry[19] (H).

μ es la permeabilidad del núcleo, en Henry por metro (H/m).

N es el número de espiras que arrollan alrededor del núcleo.

A es el área de la sección transversal donde se arrolla el inductor ($m^2$).

l es la longitud media del circuito magnético, que sería aproximado al perímetro del capot (m).

El inductor propuesto consiste en un bobinado alrededor de un núcleo, con un formato similar al que se observa en la Figura 17. Sobre la representación exhibida, debería enrollarse el alambre conductor, rodeando todo su perímetro:




Figura 17: forma del núcleo. Fuente: Nicoré

- **Permeabilidad magnética**

Conocida con el símbolo "μ", esta propiedad es la capacidad de un material para permitir el establecimiento de un flujo magnético a través de él. Cuanto mayor sea esa capacidad, mejor eficiencia tendremos en la capitalización de los campos magnéticos irradiados por las líneas de transmisión.

El material del núcleo puede tener diferentes valores de permeabilidad magnética en función de las características del material, básicamente de las aleaciones que lo componen. En nuestro caso, a efecto de simplificar nuestro moderado análisis, como material ferromagnético se ha elegido un acero al carbono. Su valor de permeabilidad relativa media, es decir, la permeabilidad magnética de este material, pero relativizada a la del vacío (adoptada como $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ H/m), resulta ser:

$$\mu_r = 20.000$$

Luego, la permeabilidad magnética real del material empleado resulta ser el producto de ambas. Es decir:

$$\mu = \mu_r.\mu_0$$

Con lo cual, la permeabilidad magnética del núcleo del bobinado será:

$$\mu \approx 0.0251\ \mathrm{H/m}$$

- **Área del núcleo**

Para el cálculo del área del núcleo de la bobina, se considera que la misma es de sección cuadrada redondeada en sus esquinas, con 0,08 m de lado. O sea, obtenemos un área A=0,0064 $m^2$

Estos son valores adecuados para el diseño del capot visto en la Figura 16.

- **Cantidad de espiras**

A lo largo de un núcleo ferromagnético, que presuponemos debería instalarse en el perímetro del capot, según se observa en la Figura 16; es completamente factible devanar un arrollamiento de 50,000 espiras.

En la Figura 18 se puede observar cómo se puede ir realizando este bobinado, tarea que actualmente lo realizan empresas como Mundorf[20]:




Figura 18: Muestra de un tramo de bobinado. Fuente: Mundorf

- **Espesor del conductor**

Para su construcción, se ha adoptado alambre de cobre esmaltado. Para determinar su calibre, presuponemos que en el mismo circulará una intensidad de corriente eléctrica de 1 A como máximo, por lo que, de acuerdo con las normas utilizadas en EE.UU., se ha elegido 24 AWG[6]. Este calibre tiene un diámetro de aproximadamente 0.511 mm y es adecuado para manejar corrientes de hasta 1 A.

Los datos anteriores fueron volcados a la siguiente tabla:

| Dimensiones del capot m | Perímetro del capot m | Dimensiones del núcleo m | Sección del núcleo $m^2$ | Permeabilidad μ H/m | Número de Espiras | Diámetro del alambre mm | Inductancia calculada mH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,38 x 0,67 | 2,15 | 0,08 | 0,0064 | 0,0251 | 50.000 | 0,511 | 186, 80 |

Figura 17: Parámetros de la inductancia del capot. Fuente Propia

El valor de la Inductancia L (H) obtenida en la tabla anterior, surge de reemplazar estos datos en la fórmula indicada anteriormente.

### 6.1.6. Cálculo aproximado de la energía percibida

Para proceder a calcular la energía que proporcionaría esta bobina, deberemos considerar las variaciones del campo que aportan las líneas de transmisión a lo largo del camino, situación que fue observada en las mediciones de la Figura 15.

Como se puede observar, los campos crecen en la medida que nos acercamos a los conductores. Los valores pueden ser diferentes en cada torre dependiendo de varios parámetros como la altura, concentración de redes, tensión de transmisión, etc. En nuestro análisis se ha de tomar sólo el valor máximo del campo que percibimos en las mediciones.

De acuerdo con la Ley de Faraday[21], se sabe que cuando una bobina está inmersa en un campo eléctrico alterno, se inducirá en ella una fuerza electromotriz cuyo valor dependerá de los parámetros del inductor antes calculado.

[6] AWG (American Wire Gauge), es un sistema de estandarización utilizado en Estados Unidos para medir el diámetro de los alambres eléctricos.

### 6.1.7. Fuerza electromotriz inducida (FEM)

Se puede determinar entonces la FEM y de sus máximos valores inducidos:

$$\boldsymbol{E\ máx\ = k.f.N^2.\Phi\ máx} \qquad (6)$$

Donde:

**$E_{máx}$:** La FEM máxima inducida (V). También conocido como el valor pico $\boldsymbol{E_{pico}}$, por tratarse del máximo valor que posee la sinusoide.

**K:** Constante derivada de la forma de onda sinusoidal: $\boldsymbol{K = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} = 4,44}$

**N:** Número de espiras en la bobina del toroide

**f:** Frecuencia de la señal en Hertz (Hz).

**$\Phi_{máx}$:** Flujo magnético máximo en Webers (Wb).

Calculando paso a paso:

$\boldsymbol{E_{pico}}$ = 4,44·50000V·50Hz·2.6368×10$^{-6}$ Wb = 4,44·50000·50·0.0000026368 V

$\boldsymbol{E_{pico}}$= 4,44·50000·0.00013184 V= 4,44·6.592 V

**$E_{pico}$ ≈ 29.27 V**, valor aproximado.

La FEM inducida, obtenida en los extremos de la bobina es de aproximadamente 29,27 V.

Según nuestros cálculos, basados en leyes universales y en los parámetros constructivos según la Figura 17, los valores de tensión obtenidos permitirán obtener un importante aporte energético al sistema de potencia de estos vehículos, lo cual impacta en una mayor autonomía.

### 6.1.8. Comprobación empírica del cálculo

Los datos anteriormente calculados, podrían presuponer que son solo teóricos. Por tal razón, se ha realizado un experimento práctico en los sitios descriptos en las tablas de la Figura 15.

Para tal fin, se construyó una bobina toroidal del tipo Rogowski[22] con las siguientes características:

| Diámetro: | Perímetro: | Área del núcleo: | Numero de espiras: | Permeabilidad: |
|---|---|---|---|---|
| 0,46 m | 1,470 m | 105 mm$^2$ | 3650 | 0,0130 H/m |

Figura 18: Datos de construcción de aro toroidal del experimento. Fuente Propia



Figura 19: Construcción del bobinado toroidal. Fuente Propia

Construido el aro toroidal, nos propusimos presentarlo en las mismas regiones donde se llevaron a cabo las mediciones, obteniendo los siguientes valores de tensión en los extremos del bobinado:

| Zona de Cardales – Red 132 kV | Zona de Campana – Red 500 kV |
|---|---|
| Tensión inducida medida: 145 mV | Tensión Inducida medida: 455 mV |





Figura 20: Mediciones realizadas en ambas zonas. Fuente Propia.

### 6.2. Análisis de los datos

Es muy interesante comprobar empíricamente los resultados que surgen del cálculo teórico, verificando así la existencia real de las energías provenientes de tales redes de distribución.

Surge del análisis de los datos que en todas las redes de transmisión de energía existen pérdidas, las que terminan impactando en forma negativa en el medio ambiente, como ocurre con inducciones por generación de corrientes parásitas, que producen mucho daño sobre el medio ambiente, animales y también en el ser humano, según lo explica J. Skvarca[23] en su trabajo. Pocos países han tomado conciencia de tal daño y aún no han normalizado esas emisiones.

Mientras tanto, es importante considerar que su uso, permitirá convertir en útil aquello que hoy se encuentra desaprovechado.

Los valores que se han obtenido de las mediciones y las tensiones calculadas, tanto generadas por los campos eléctricos como por los magnéticos, son una prueba clara y contundente de que no sólo hay energía disponible a nuestro alrededor, sino que ésta también podría ser aprovechada con dos fines sumamente útiles: Ayudar a mantener cargado el sistema de suministro de energía de los vehículos eléctricos, o, por lo menos, a ralentizar su descarga; y a disminuir el impacto ambiental que provocaría el hecho de tener que lograr el mismo flujo energético pero proveniente de una matriz como la matriz energética argentina, con más del 60% de su constitución basada en la quema de combustibles fósiles.

Por supuesto que no está contemplado en el alcance de este trabajo la cuantificación de la energía que estos fenómenos pueden aportar. El propósito fue simplemente demostrar que actualmente hay variadas fuentes al alcance de la mano que están sin ser explotadas. La cuantificación de los beneficios requerirá una mayor inversión en instrumental y equipamiento para realizar ensayos con diferentes bobinados, bajo distintas condiciones de inducción y bajo un análisis de zonas mucho más exhaustivo.

#### 6.2.1.Compatibilidad Electromagnética (EMC) en Carga Inalámbrica

- **Normativas y estándares**

Explica cómo regulaciones como SAE J2954 establecen límites de emisiones electromagnéticas para garantizar la interoperabilidad y seguridad.

Diseño de blindaje electromagnético: Detalla cómo los materiales y estructuras de los sistemas de carga minimizan la interferencia con otros dispositivos electrónicos.

Pruebas de EMC: Menciona los procedimientos de evaluación para asegurar que los sistemas cumplen con los requisitos de compatibilidad.

#### 6.2.2.Efectos de la Interferencia Electromagnética (EMI)

- **Impacto en dispositivos cercanos**

Describe cómo la EMI puede afectar teléfonos móviles, equipos médicos y otros sistemas electrónicos sensibles.

Generación de armónicos y ruido electromagnético: Explica cómo la conmutación de alta frecuencia en la carga inalámbrica puede producir emisiones no deseadas.

Métodos de mitigación: Incluye estrategias como el uso de filtros EMI, modulación de frecuencia y ajustes en el diseño de bobinas para reducir interferencias.

## 7. Otras alternativas de recarga de baterías de los EV

### 7.1. Recarga por Energía eólica

Vimos en el apartado anterior que una masa de aire en movimiento da lugar a un fenómeno de inducción electromagnética.

Pero también debemos tener en cuenta que toda partícula de masa "*m*" animada de una velocidad "*v*" porta una cierta cantidad de energía cinética:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (7)$$

Este es ni más ni menos que el principio de funcionamiento de los aerogeneradores, que por nuestros días están convirtiéndose en una de las estrellas de la generación sustentable en el mundo.

Mediante la incorporación de microturbinas eólicas ubicadas estratégicamente ocultas pero expuestas a la incidencia de las corrientes de aire que provoca el desplazamiento del vehículo, se podría aprovechar dicha energía cinética y convertirla en energía eléctrica para ser aportada al sistema de potencia del automóvil.

### 7.2. Recarga de Energía en forma inalámbrica

La recarga inalámbrica de vehículos eléctricos en movimiento es un concepto avanzado que podría revolucionar la alimentación energética de estos vehículos durante su funcionamiento. Actualmente, la recarga inalámbrica se implementa en vehículos estacionarios mediante tecnologías como la inducción magnética. Sin embargo, la recarga en movimiento implica desafíos significativos tanto en el ámbito técnico como en el de infraestructura.

Esto incluye la necesidad de desarrollar sistemas de transferencia de energía de alta eficiencia que puedan operar en condiciones dinámicas.

La integración de dichos sistemas en las rutas y autopistas existentes, y la gestión de la seguridad y estabilidad de la transferencia de energía a altas velocidades se fundamentan principalmente en la tecnología de inducción magnética dinámica "*Dynamic Wireless Charging*".

Este sistema emplea campos magnéticos generados por bobinas de inducción embebidas en la infraestructura vial y receptores instalados en el chasis del vehículo para efectuar la transferencia de energía de manera inalámbrica durante su desplazamiento.

La eficiencia de este sistema depende de la sincronización precisa entre las bobinas emisoras y los receptores, así como de la capacidad de gestionar la transferencia energética en condiciones dinámicas y variables. La viabilidad de la recarga inalámbrica en movimiento requiere la instalación de bobinas de inducción a lo largo de las carreteras o en carriles específicos de éstas.

Estas bobinas generan campos electromagnéticos de alta frecuencia captados por receptores en los vehículos, permitiendo la carga continua de las baterías mientras se desplazan.

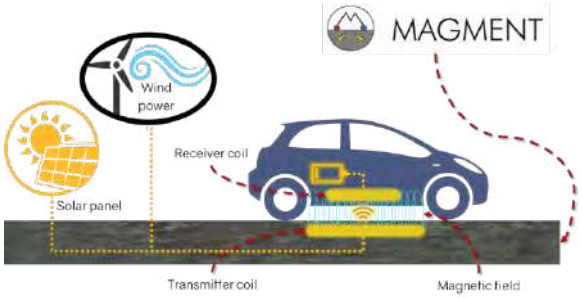



Figura 12. Sistema *Dynamic Wireless Charging*[24]

### 7.2.1. Ventajas potenciales

- Los vehículos eléctricos podrían ir recuperando energía mientras circulan, lo que eliminaría la necesidad de paradas frecuentes para cargar baterías. En el caso más optimista, estos vehículos podrían haber transitado determinadas distancias según la extensión de la red, con un balance neto de 0 kWh.Mayor eficiencia energética: La recarga constante mientras el vehículo se desplaza podría hacer un uso más eficiente de la energía, optimizando los tiempos de carga.
- Impulso a la adopción de vehículos eléctricos: Esta tecnología podría hacer que los vehículos eléctricos sean más atractivos, eliminando dos de sus principales limitaciones, que son su magra autonomía y los tiempos de reaprovisionamiento energético.

### 7.2.2. Desafíos técnicos y económicos

- Costo y viabilidad económica: Instalar y mantener esta infraestructura es costoso y logísticamente complejo, especialmente a gran escala. La implementación de bobinas de inducción en carreteras es cara y requiere adaptación de infraestructuras urbanas.
- Alto costo de mantenimiento: Más allá de la inversión inicial, las bobinas pueden sufrir daños y su mantenimiento es complejo y costoso.
- Reducir costos de materiales y mejorar durabilidad. Integración en áreas de alto tránsito podría hacerlo más rentable. Se está trabajando en el uso de hormigones magnetizables y mejoras en la tecnología de transferencia de energía.
- Eficiencia y seguridad: La transferencia de energía a alta velocidad y sin contacto físico debe ser extremadamente eficiente para garantizar que los vehículos reciban suficiente energía sin pérdidas significativas. Los sistemas de recarga inalámbrica, especialmente los de inducción

magnética, pueden perder energía en forma de calor, provocando esto una menor eficiencia y mayor consumo de electricidad. Otros aspectos a tener en cuenta, variables en estos casos, son la distancia, la alineación de las bobinas y la interferencia de objetos metálicos. Se están investigando mejoras para alcanzar eficiencias del 85-90%.

- Compatibilidad de vehículos: Los vehículos eléctricos necesitarían estar equipados con sistemas receptores estándar para interactuar con la infraestructura de recarga dinámica, lo que podría requerir cambios en las líneas de producción de los vehículos existentes.

### 7.2.3. Compatibilidad entre Vehículos y Estaciones de Carga

- Estándares no unificados: La falta de un estándar global podría causar incompatibilidades entre vehículos y estaciones de carga.
- Interoperabilidad: Es crucial para la adopción masiva que haya compatibilidad.
- Se propone el desarrollo de estándares globales para garantizar la compatibilidad en sistemas de carga inalámbrica de vehículos eléctricos. Un ejemplo de ello es el protocolo SAE J2954, el cual establece criterios precisos de interoperabilidad, compatibilidad electromagnética, requisitos mínimos de rendimiento, seguridad y procedimientos de prueba para la transferencia de energía inalámbrica (WPT) en vehículos enchufables de servicio ligero y mediano.

  Esta norma define diversos niveles de carga, que van desde WPT 1 hasta WPT 5, con capacidades que varían entre 3,7 kW y 50 kW. Su alcance abarca tanto la infraestructura de carga doméstica como la pública. Además, contempla la posibilidad de carga unidireccional y bidireccional, así como aplicaciones en sistemas estacionarios.

  Para los vehículos de servicio pesado y los sistemas de carga dinámica, las especificaciones se encuentran en los estándares SAE J2954/2 y SAE J2954/3, que abordan las necesidades de alta potencia y movilidad avanzada.

  El proceso de desarrollo de esta norma se fundamentó en evaluaciones de rendimiento y en la definición de dispositivos de referencia, asegurando su eficiencia y confiabilidad en diversas condiciones operativas. Distancia y Alineación entre Bobinas

- Desajuste de alineación: La alineación precisa es crucial para la eficiencia. La distancia debe ser menor a 10 cm.
- Solución: Sistemas de alineación automática y técnicas de resonancia magnética para mejorar el rango de transferencia.

### 7.2.4. Interferencias y Efectos sobre la Salud

- Campos electromagnéticos: Preocupaciones sobre efectos a largo plazo y regulaciones necesarias.
- Interferencias: Los campos magnéticos podrían interferir con otros dispositivos electrónicos y de comunicación.
- Solución: Minimizar interferencia electromagnética y asegurar niveles bajos de exposición.

### 7.2.5. Velocidad de Recarga

- Recarga más lenta: Generalmente, los sistemas inalámbricos son más lentos que los de recarga rápida por cable.
- Solución: Avances en bobinas de alta frecuencia, materiales superconductores y mejores sistemas de alineación.

### 7.2.6. Costos de Vehículos Compatibles

- Precio: Los vehículos deben estar equipados con sistemas de recepción de energía inalámbrica, lo que aumenta el costo.
- Modificación de vehículos existentes: Proceso costoso y técnicamente desafiante.
- Solución: Producción a gran escala y estandarización para reducir costos.

### 7.2.7. Impacto Ambiental

- Consumo de recursos: La instalación de infraestructura requiere materiales que pueden tener un impacto ambiental negativo.
- Desecho de equipos: Considerar los impactos de la basura electrónica.
- Solución: Desarrollar tecnologías más sostenibles y reciclables.

## 7.3. Proyectos en Curso

### 7.3.1.Proyecto Electreon

Desarrollado en Suecia e Israel, prueba la recarga inalámbrica de vehículos eléctricos en movimiento. Utiliza inductores de alta frecuencia integrados en la carretera.

**Características Técnicas:**

- Frecuencia de operación: 85 kHz.
- Tipos de vehículos: Autobuses eléctricos y camiones, con exploración para vehículos ligeros.
- Eficiencia de transferencia de energía: 80% a 90%.
- Potencia suministrada: Hasta 200 kW.
- Instalación de bobinas: Debajo de la carretera en carriles específicos.
- Distancia de carga: Eficaz hasta 90 km/h y con una separación menor a 30 cm.

**Resultados Obtenidos:**

- Pruebas exitosas. Autobuses eléctricos operaron varias horas recibiendo carga en forma continua.
- Cobertura de carretera: Tramos de 500 metros en Israel, con planes de expansión.
- Impacto en la autonomía: El reaprovisionamiento continuo durante la circulación aumenta significativamente la autonomía.

### 7.3.2.Proyecto de Carga Inalámbrica de Vehículos en Movimiento

Diversos estudios globales evalúan la carga inalámbrica de vehículos eléctricos en movimiento, destacando:

- Potencia: Hasta 200 kW para camiones y vehículos comerciales.
- Eficiencia: Hasta 90% en la transferencia de energía.
- Infraestructura: Instalación de carriles de carga en vías de alta velocidad, especialmente en áreas urbanas.

En Corea del Sur, un proyecto en colaboración con la Universidad de Pohang investiga la viabilidad de sistemas de carga inalámbrica dinámica en carreteras.

**Características Técnicas:**

- Frecuencia de operación: 85 kHz a 100 kHz.
- Potencia de carga: 50 kW a 100 kW.
- Vehículos de prueba: Vehículos eléctricos de pasajeros y autobuses.
- Tecnología de recarga: Inductores enterrados en el pavimento y receptores de carga en los vehículos.

**Resultados Obtenidos:**

- Pruebas de eficiencia: Transferencia de energía efectiva a velocidades de hasta 80 km/h con más del 85% de eficiencia.
- Implementación parcial: Tramos de 200 metros de carretera con carga inductiva, con planes de expansión.

- Autonomía mejorada: Mayor tiempo de operación y distancias más largas sin necesidad de paradas para recargar.

#### 7.3.3.Concreto magnético Magment

Magment[25] produce cemento magnetizable que adquiere propiedades magnéticas con corrientes eléctricas de alta frecuencia. Este nuevo pavimento, hecho de cemento y partículas de ferrita recicladas, mejora la transferencia de energía y es económico, resistente y fácil de integrar en la construcción. La tecnología de carga utiliza transmisores en la vía y bobinas de inducción incrustadas en losas de cemento magnetizado, aplicable a monopatines eléctricos y electrodomésticos.

**Estudio del Comportamiento Termomecánico del Pavimento con Inductores**

Se han realizado ensayos y simulaciones para estudiar el comportamiento mecánico y térmico de una carretera eléctrica con pavimento bituminoso.

**Ensayos y Modelado:**

- Ensayos de laboratorio: Evaluación del comportamiento mecánico y térmico a escala reducida, incluyendo pruebas de seguimiento de ruedas y flexión de cuatro puntos.
- Modelado de elementos finitos: Simulaciones térmicas y mecánicas para evaluar el rendimiento del pavimento bajo cargas pesadas y variaciones de temperatura.

**Recomendaciones:**

- Caracterización de propiedades mecánicas y térmicas de los materiales.
- Caracterización de la resistencia de las interfaces entre el sistema de carga y los materiales del pavimento.
- Ensayos de seguimiento de ruedas para estudiar deterioros como surcos, grietas o desprendimiento de la interfaz.
- Ensayos de rendimiento de carga y variaciones de temperatura inducidas.
- Simulaciones térmicas y mecánicas para evaluar tensiones y deformaciones en la estructura y riesgos de fallo.

## 8. Conclusión

La recarga inalámbrica de vehículos eléctricos tiene el potencial de transformar la forma en que utilizamos la energía para la movilidad eléctrica, pero aún enfrenta varios desafíos técnicos, económicos y ambientales que deben ser superados para hacerla viable a gran escala.

A medida que se desarrollen nuevas soluciones tecnológicas y se resuelvan estos problemas, la recarga inalámbrica podría convertirse en una de las opciones más convenientes y eficaces para el futuro de la movilidad eléctrica.



Figura 18: Rutas con alta probabilidad de captura de energía. Fuente: propia

Hemos demostrado la segunda hipótesis planteada, donde las redes de transmisión y distribución eléctricas están presentes en la mayoría de las regiones y en muchos casos ordenadas en entorno de las mismas rutas donde transitamos. Nos han permitido detectar importantes acciones electromagnéticas, las que se han podido valorizar con dispositivos adecuadamente diseñados.

Conseguimos evaluar esas inducciones perdidas de las redes, que para nosotros resultaron ser recursos energéticos. Los valorizamos con nuestro equipamiento, el que demuestra el objetivo de poder con esa energía recargar baterías de los "*EV*", sin que este, detenga la marcha, aumentando la autonomía y logrando así un adecuado uso de nuestro tiempo y un mayor aprovechamiento de las energías.

Otras líneas de investigación abiertas, mencionadas en nuestro objetivo, como la variedad de métodos muy útiles para aumentar la autonomía de los vehículos, o su reducción en la cantidad de tiempo detenido para suministrar carga a sus baterías, el desafío de poder lograr mejores avances en cuanto a cada una de las observaciones que obtuvimos en el presente trabajo.

## 9. Bibliografía


1. Díaz-Rodríguez, J., Pabón-Fernández, L., & Pardo-García, A. (2012). Sistema híbrido de energía utilizando energía solar y red eléctrica. Lámpsakos, (7), 69-77.
2. Mendoza Chicaiza, J. L. (2019). Sistema electrónico portátil para la recarga eléctrica de dispositivos móviles mediante la captación de energía electromagnética (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. Carrera de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones).
3. Castellanos Domínguez, C. G. Puesta a tierra y perturbaciones electromagnéticas en equipos de carga sensible. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.
4. Braun, E. (2003). Electromagnetismo: de la ciencia a la tecnología (No. Sirsi) i9789681668488). Fondo de cultura económica.
5. Daura, F. Electromagnética en la automoción.
6. Ciaurri, I. E. (2016). Caracterización electromagnética de un vehículo 4x4 eléctrico (Doctoral dissertation, Universidad de Zaragoza).
7. Varela-Chávez, C. (2020). Aplicaciones de energía cinética en electromovilidad autónoma y sostenible. Revista UIS Ingenierías, 19(4), 167-180.
8. https://electreon.com/
9. https://www.magment.co/
10. Pavement integration of an inductive charging system for electric vehicles. Results of the INCIT-EV Project
11. SAE J2954
12. https://www.tut.ac.jp/english/newsletter/archive/no9/research_highlights/research01.html


## 10. Referencias


[1] Titular. Ingeniero Electromecánico, UBA. Profesor, Investigador Facultad de Ingeniería, Universidad del Salvador. Dirección particular, Champagnat 1300, Pilar, Prov. de Buenos Aires, Argentina. Teléfono: 0054-011-4242-2258 Celular: 005491156661935. Email: grassi.juanjose@usal.edu.ar

[2] Co Titular. Ingeniero Eléctrico, UTN. Profesor, Investigador Facultad de Ingeniería, Universidad del Salvador. Dirección particular, Azcuénaga 2333, Martínez, Prov. Buenos Aires, Argentina. Teléfono: 0054-11-6797-2095 Celular: 005491167972095. Email: cesar.bonantini@usal.edu.ar

[3] Investigador Adjunto. Ingeniero Mecánico.

[4] Alumno practicante de grado.

[5] Alumno practicante de grado.

[6] https://www.tesla.com/es_cl/manufacturing

[7] https://afdc.energy.gov/stations#/find/nearest?ev_levels=all&country=US&fuel=ELEC

[8] https://ruralclimate.org/es/project/coltura/

[9] https://www.xmap.ai/blog/gas-stations-in-united-states-of-america-everything-you-need-to-know#how-many-gas-stations-in-usa

[10] https://www.elespanol.com/

[11] https://www.hibridosyelectricos.com/coches/primeras-imagenes-lightyear-2-coche-electrico-solar-barato_66741_102.html

[12] http://p3.usal.edu.ar/index.php/anuarioinvestigacion/article/view/5692

[13] Montiel, S. A. C., Padilla, R. D. C. L., & Parada, A. G. (2009). Bobina Rogowski como sensor de corriente para monitoreo de transformadores de distribución. no, 1, 1-7.

[14] https://materias.df.uba.ar/ft1a2020c2/efecto-triboelectrico/

[15] https://cammesaweb.cammesa.com/

[16] Medidor de radiación profesional BENETECH GM3120

[17] Mujal Rosas, R. M. (2013). *Cálculo de líneas y redes eléctricas*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.

[18] https://www.electricity-magnetism.org/es/bobina-toroidal/

[19] Moyer, A. E. (2018). *Joseph Henry*. Smithsonian Books.

[20] https://www.mundorf.com/

[21] Murguía, A., Kuperstein, G., Trespalacios, R., Barakat, G., & Marymount, C. (2010). Péndulo para ilustrar la ley de Faraday: variación de la fuerza electromotriz y mecánica al cambiar el número de espiras en una bobina. *Metodología de la Investigación*, *16*, 05.

[22] Seuret Jiménez, D., & Oseguera, S. (2014). Diseño y construcción de bobinas de Rogowski modificadas de bajo costo y alto desempeño. *Nova scientia*, *6*(12), 219-233.

[23] Skvarca, J., & Aguirre, A. (2006). Normas y estándares aplicables a los campos electromagnéticos de radiofrecuencias en América Latina: guía para los límites de exposición y los protocolos de medición. *Revista Panamericana de Salud Pública*, *20*, 205-212.

[24] https://www.evoltsoft.com/

[25] https://www.researchgate.net/publication/342465431_Concreto_Magnetico_Concreto_Magnetico



# Eje 4
# Empresas de Triple Impacto

# GESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN HOGARES DE ARGENTINA: ANÁLISIS DE RETOS Y OPORTUNIDADES

Moreno, Valeria K.; Alfarano, Javier; Freytes, Mariano;
Luque Vazquez, Florencia; Monasterolo, Nicolás

*Facultad Regional Córdoba, Facultad Regional Tierra del Fuego,*
*Grupo de Investigación en Control Avanzado de Procesos y Producción (GICAPP),*
*Universidad Tecnológica Nacional (UTN).*
*vmoreno@frc.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

El presente trabajo analiza la situación actual de la gestión de residuos orgánicos en los hogares argentinos, poniendo especial énfasis en el compostaje doméstico como estrategia viable para reducir los impactos ambientales asociados a los residuos sólidos urbanos (RSU). A partir de una encuesta nacional y el análisis de experiencias internacionales exitosas, se identificaron barreras, oportunidades y recomendaciones para fomentar la separación en origen y la adopción del compostaje en contextos residenciales.

Se realizó un análisis comparativo de programas de gestión de residuos orgánicos en distintas regiones de Argentina, evaluando su diseño, implementación y resultados. Esta comparación permitió identificar fortalezas y debilidades de cada iniciativa, y extraer aprendizajes valiosos sobre las condiciones que favorecen el éxito de estas políticas. A partir de esta evaluación, se proponen recomendaciones concretas y adaptadas a nivel local, orientadas a mejorar la eficacia de los programas actuales y a promover una adopción más generalizada del compostaje y la separación en origen.

**Palabras Claves:** Gestión de residuos orgánicos, Compostaje doméstico, Cambio climático, GEI, RSU, Sostenibilidad.

**ABSTRACT**

This paper analyses the current situation of organic waste management in Argentine households, focusing on home composting as a viable strategy to reduce environmental impacts associated with municipal solid waste (MSW). Based on a national survey and the review of successful international experiences, barriers, opportunities, and recommendations were identified to foster source separation and the adoption of composting in residential contexts. A comparative analysis of programs implemented in different regions of Argentina was also conducted, highlighting strengths, weaknesses, and key lessons. The study concludes with practical recommendations to improve the effectiveness of local initiatives and to promote widespread adoption of home composting as a key strategy to reduce greenhouse gas emissions and contribute to climate change mitigation.

**Keywords:** Organic waste management, Home composting, Climate change, GHG, MSW, Sustainability.

## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) se ha convertido en uno de los grandes retos ambientales, sociales y económicos de las ciudades contemporáneas. A nivel global, se estima que los residuos orgánicos constituyen entre el 44 % y el 55 % de la fracción total de RSU (Environment, 2024), y su disposición inadecuada en vertederos representa una de las principales fuentes de emisiones de metano, un gas con un potencial de calentamiento global 28 veces superior al del $CO_2$ en un horizonte de 100 años (ACCIONA, 2024; IPCC, 2014). Además de su contribución al cambio climático, la acumulación y descomposición no controlada de residuos orgánicos genera lixiviados que contaminan el agua y el suelo, y favorece la proliferación de vectores que afectan la salud pública (EPA, 2016).

En el caso de Argentina, los residuos orgánicos representan aproximadamente el 51 % de los RSU (Vicejefatura de Gabinete del Interior, 2019b, 2019a). La mayor parte de estos residuos termina en rellenos sanitarios o en basurales a cielo abierto, lo que genera un problema ambiental de gran magnitud y una presión creciente sobre los sistemas de disposición final. Se estima que los RSU domésticos aportaron en 2018 alrededor del 4 % de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero (*Inventario GEI*, 2020). Este escenario evidencia la necesidad de promover estrategias más sostenibles para el manejo de la fracción orgánica.

Dentro de las alternativas disponibles, la separación en origen constituye un paso fundamental para el éxito de cualquier política de gestión de residuos. Entre las opciones de tratamiento de la fracción orgánica, el compostaje domiciliario se presenta como una solución de bajo costo, adaptable a diferentes escalas y con múltiples beneficios ambientales y sociales. No solo permite reducir significativamente la cantidad de residuos enviados a disposición final, sino que también genera un insumo útil (compost) para la mejora de suelos y la producción local de alimentos, cerrando así ciclos en una lógica de economía circular.

En este contexto, el presente trabajo analiza la situación actual de la gestión de residuos orgánicos en Argentina, poniendo especial énfasis en el compostaje domiciliario como estrategia viable y complementaria a otras políticas de gestión integral. A partir de un relevamiento de datos nacionales y provinciales, una encuesta aplicada a hogares argentinos y la revisión de experiencias internacionales, se identifican barreras, oportunidades y recomendaciones para promover la adopción del compostaje y la separación en origen en el ámbito doméstico. De este modo, el estudio busca aportar evidencia para el diseño de políticas públicas más eficaces y contribuir al debate sobre el rol de los hogares en la mitigación del cambio climático y la transición hacia modelos de consumo más sostenibles.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología de este estudio combinó un enfoque descriptivo y exploratorio, sustentado en la recopilación y análisis de información secundaria, complementado con datos primarios obtenidos mediante encuestas. El procedimiento se estructuró en seis pasos, que permitieron avanzar desde el diagnóstico general hasta la formulación de propuestas específicas para la gestión de residuos orgánicos en Argentina:

### Paso 1. Análisis general de la composición de RSU.

Se recopilaron y analizaron informes oficiales de la Vicejefatura de Gabinete del Interior (2019a, 2019b), el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021, 2023) y la Secretaría de Ambiente (2019), con el fin de caracterizar la composición de los residuos sólidos urbanos (RSU) en Argentina y determinar su disposición final. A partir de estos datos se calculó el peso relativo de los residuos orgánicos dentro del total de RSU y se estimaron las emisiones asociadas a su eliminación, expresadas en toneladas de $CO_2$ equivalente ($TnCO_2eq$).

### Paso 2. Selección del tipo de residuo a analizar.

Con base en el análisis previo, se identificó que los residuos orgánicos representan más del 50% del total de RSU en Argentina, por lo que se definió a esta fracción como objeto principal de estudio.

### Paso 3. Revisión de prácticas internacionales.

Se realizó una revisión de experiencias internacionales de gestión de residuos orgánicos en países de referencia (Estados Unidos, España, India, China, Australia, Suecia, Alemania y Brasil). Para ello se consultaron informes oficiales, literatura científica y fuentes institucionales, con el fin de identificar buenas prácticas aplicables al contexto argentino.

**Paso 4. Encuesta a hogares argentinos.**

Se llevó a cabo una encuesta en 2022 a 327 personas de entre 18 y 70 años, residentes en áreas urbanas y con nivel socioeconómico medio y medio-alto. El cuestionario, distribuido de manera online, recogió información sobre: acceso a áreas verdes en el hogar, prácticas de separación de residuos, experiencias previas de compostaje y barreras percibidas. Los resultados se analizaron de forma descriptiva para identificar tendencias y oportunidades de implementación de compostaje domiciliario.

**Paso 5. Desarrollo de las propuestas.**

En base a los datos e informes relevados, se consideraron dos propuestas que abordan que parten del hogar y se extienden a la comunidad generando un impacto colectivo.

**Propuesta Individual:** a partir de la evidencia empírica, se elaboró una propuesta de compostaje domiciliario como estrategia central para la reducción de residuos orgánicos en Argentina. Se incorporaron aportes de literatura académica (Bernal et al., 2009; Faverial & Sierra, 2014; Sánchez & Gabriel, 2014) y experiencias locales (Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible, 2021), así como cálculos de reducción potencial de emisiones de $CO_2$eq mediante esta práctica.

**Propuesta colectiva:** se realizó un mapeo de iniciativas locales, provinciales y nacionales orientadas a la gestión de residuos orgánicos, incluyendo programas de compostaje comunitario, planes de gestión integral de RSU (GIRSU), proyectos de erradicación de basurales y experiencias de valorización energética mediante biogás. Este relevamiento permitió identificar la heterogeneidad de estrategias, sus principales barreras (educativas, políticas y estructurales) y las oportunidades para su escalamiento.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Paso 1: Análisis general de la composición de RSU

Se ha determinado la composición de los RSU en Argentina en base a una recopilación de datos de diversas fuentes vinculadas a cada una de las provincias del país (Vicejefatura de Gabinete del Interior, 2019b, 2019a). La mayor parte de los residuos generados en Argentina se debe al consumo de alimentos u otros tipos de derivados productores de desechos orgánicos, más de la mitad de la composición contempla esta clasificación. Se pudo observar que la mayor generación de RSU por día es en la provincia de Buenos Aires, lo cual esto se encuentra asociado a la elevada concentración poblacional que la caracteriza, como así también, la posición socioeconómica que posee.

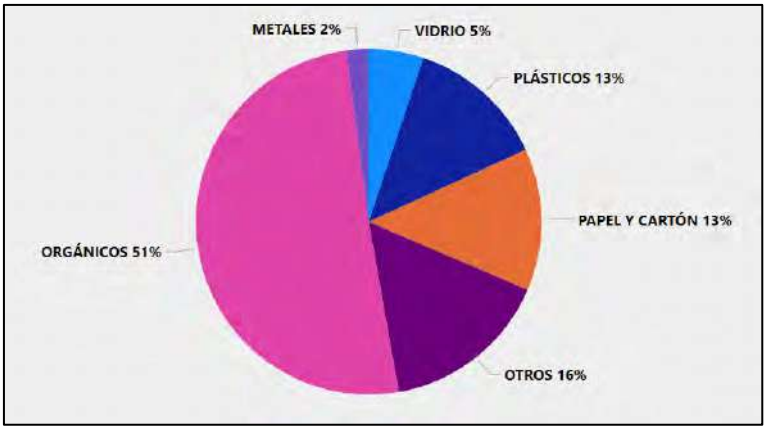



Figura 1. Proporción de RSU en Argentina

En Argentina, el 64,7% de los residuos se destinan a rellenos sanitarios, mientras que el 35,3% restante se dispone de manera inadecuada: aproximadamente el 10% terminan en vertederos controlados y el 25% a basurales a cielo abierto (Vicejefatura de Gabinete del Interior, 2019b). Esta disposición final inadecuada de los residuos sólidos urbanos (RSU) genera metano, el principal gas de efecto invernadero (GEI) del sector de residuos. En 2018, los RSU domésticos representaron el 4% de las emisiones totales del país (MAyDS, 2021, 2023; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019).

Se realizó el cálculo total de emisiones asociadas a la eliminación de RSU en Argentina, considerando las emisiones de metano, $CO_2$ neto y $N_2O$ para el año 2018, expresadas en toneladas de $CO_2$ equivalente ($TnCO_2eq$) (MAyDS, 2021, 2023; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019). Usando datos históricos de emisiones entre 1990 y 2018 y la tasa de crecimiento poblacional entre 2018 y 2022 (INDEC, 2019), se proyectaron las emisiones de RSU para el año 2022, resultando en un total de 10.130.944 $TnCO_2eq$. Esta estimación refleja la necesidad de una gestión más efectiva de los residuos para reducir su impacto ambiental.

### 3.2. Paso 2: Definición del tipo de residuo a analizar

Del análisis anterior se concluye que el principal RSU originado domésticamente es del tipo orgánico, con un valor que supera el 50%. Este tipo de residuos, al ser de naturaleza biodegradable dado su origen animal o vegetal, permite aprovechar su descomposición natural relativamente simple para poder transformarlo en materia orgánica utilizable.

### 3.3. Paso 3: Revisión de prácticas internacionales

Después de analizar la composición de los residuos sólidos urbanos (RSU) en Argentina y confirmar que el 51% son orgánicos, se exploraron las estrategias de gestión de residuos orgánicos implementadas en otros países. En California, Estados Unidos, la Ley SB 1383 ha sido clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al exigir la recuperación y compostaje de residuos orgánicos, con beneficios como la reducción de gases y la ayuda a familias necesitadas (California, 2024; Palimaru et al., 2022).

India, con su modelo descentralizado en Thiruvananthapuram, ha empoderado a los ciudadanos para separar y compostar residuos en origen, un enfoque que podría ser aplicable en áreas rurales de Argentina (*Kerala State Planning Board*, n.d.)

España, por su parte, adoptó un impuesto a los envases plásticos de un solo uso, promoviendo el uso de materiales reciclados productivos (Ley 7/2022, 2022; Roger, 2022). En Cataluña, España, la planta de tratamiento y valorización energética de Mataró utiliza residuos orgánicos para producir biogás y energía renovable, además de recuperar materiales valiosos como el vidrio (Sacyr, 2024).

Mientras tanto, Beijing, China, ha desarrollado tecnologías avanzadas para convertir residuos alimentarios en fertilizantes, un modelo que, aunque requiere inversión, podría ser viable en áreas urbanas densas de Argentina (*China Waste Turn Into Fertilizer | GGT*, n.d.). Melbourne, Australia, lidera con una planta de compostaje que reduce un 85% los residuos orgánicos y un programa estatal que subsidia elementos de compostaje para hogares (City of Melbourne, 2024; RETEMA, 2019).

Suecia y Alemania destacan por su educación ambiental y elevados índices de reciclaje, prácticas que podrían ser implementadas en Argentina para fomentar la separación de residuos (Iglhau, 2023; MasAzul, 2021; The Circular LAb, 2017). Finalmente, el proyecto de compostaje descentralizado en San Pablo, Brasil, muestra cómo las comunidades pueden gestionar residuos localmente con éxito (PANORAMA, 2020).

Estas experiencias internacionales demuestran que existen múltiples estrategias efectivas que Argentina puede adaptar, con el compostaje como un pilar central, para avanzar hacia una gestión más sostenible y eficiente de sus residuos orgánicos.

### 3.4. Paso 4: Encuesta a hogares

Para obtener una visión precisa de la gestión de residuos en Argentina, se realizó en 2022 una encuesta a 327 personas de todo el país, de entre 18 y 70 años, provenientes de áreas urbanizadas con nivel socioeconómico medio y medio alto. Los resultados destacaron oportunidades y desafíos clave. El 61% de los encuestados indicó tener acceso a áreas verdes en sus hogares, un factor crucial para la implementación del compostaje doméstico, una de las prácticas más eficaces para la gestión de residuos orgánicos y que ha sido determinante en países como Suecia (Ermolaev et al., 2014). No obstante, solo el 35% separa sus residuos sólidos urbanos (RSU), lo que revela una baja adopción de prácticas de separación, a pesar de las condiciones favorables.

Este bajo porcentaje sugiere que existen barreras, como la falta de concientización, la ausencia de incentivos y la percepción de complejidad en la separación de residuos. Además, solo el 19% de los

encuestados ha practicado el compostaje alguna vez, lo que indica que esta práctica no está generalizada, a diferencia de países como Brasil, donde se ha impulsado a través de políticas públicas, programas comunitarios y campañas educativas (UN Habitat, 2015).

En resumen, aunque existe un gran potencial para mejorar la gestión de residuos orgánicos en Argentina, es necesario un esfuerzo coordinado que incluya educación, incentivos y políticas públicas para promover la adopción de prácticas sostenibles, como el compostaje. Aprovechar este potencial permitirá al país alinearse con las mejores prácticas internacionales y avanzar hacia una gestión de residuos más eficiente.

### 3.5. Paso 5: Desarrollo de la propuesta

En este estudio se identifican dos niveles de acción complementarios para la gestión de residuos orgánicos:

(i) Acciones individuales, representadas principalmente por el compostaje domiciliario, una práctica accesible y de bajo costo que puede implementarse en los hogares con resultados inmediatos.
(ii) Acciones colectivas, vinculadas a programas municipales, provinciales y nacionales que, al contar con apoyo gubernamental, presentan mayores probabilidades de éxito y continuidad. En este marco, se propone el compostaje como estrategia doméstica clave (Sección 3.5) y, a la vez, se analizan los principales programas públicos implementados en el país (Sección 3.6), evaluando su alcance, limitaciones y oportunidades.

**Compostaje como acción individual en los hogares**

Es fundamental destacar que cualquier medida destinada a mejorar la reducción de residuos debe comenzar con la separación de los desechos generados a nivel doméstico, un paso esencial para implementar eficazmente técnicas de reutilización o reciclaje (Wilson et al., 2015). Este estudio aborda el compostaje como una estrategia clave para reducir el impacto ambiental de los desechos orgánicos. El compostaje es un proceso biológico que transforma la materia orgánica en abono natural a través de la acción de microorganismos como bacterias y hongos (Bernal et al., 2009). Esta técnica es ideal para viviendas con jardín, aunque existen composteras adecuadas para balcones en departamentos, aptas para los desechos generados por una o dos personas (Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible, 2021).

El compostaje es sencillo, económico y puede ser realizado con materiales reutilizados (Faverial & Sierra, 2014). Además, su mantenimiento requiere poco tiempo y, si se realiza correctamente, no genera olores desagradables (Sánchez & Gabriel, 2014). La implementación del compostaje es crucial, ya que los residuos orgánicos, principalmente restos alimenticios, son más difíciles de reducir o reutilizar comparados con materiales como plástico, metal o vidrio. Estudios demuestran que el compostaje puede reducir hasta un 65% las emisiones de $CO_2$ equivalente asociadas a los residuos orgánicos (INCLAM, 2013). En Buenos Aires, el compostaje ya ha mostrado eficacia, logrando ahorros en logística y reduciendo emisiones de gases de efecto invernadero. Se estima que la adopción masiva del compostaje en los hogares argentinos podría disminuir las emisiones en un 65% (Sánchez & Gabriel, 2014). La descomposición inadecuada de residuos orgánicos en vertederos genera metano, cuyo potencial de calentamiento global es 28 veces mayor que el del $CO_2$ en un horizonte de 100 años (IPCC, 2014). Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), una tonelada de residuos orgánicos en vertederos puede generar alrededor de 2,94 toneladas de $CO_2$ equivalente (EPA, 2016).

El compostaje contribuye a mitigar el cambio climático al reducir los residuos destinados a rellenos sanitarios (EPA, 2016). De hecho, el informe "El compostaje: receta para reducir la huella de carbono en España" indica que esta práctica puede reducir hasta un 65% las emisiones derivadas de la gestión de residuos (INCLAM, 2013).

Actualmente, los residuos orgánicos constituyen el 51% de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en Argentina, lo que equivale a unas 5.166.781 toneladas de $CO_2$ equivalente (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019). La adopción generalizada del compostaje podría reducir estas emisiones a aproximadamente 1.808.373 $TnCO_2eq$, evidenciando su potencial como una solución clave para el impacto ambiental en Argentina.

**Programas y acciones colectivas con respaldo institucional**

Más allá de las acciones individuales, la sostenibilidad y el escalamiento de la gestión de residuos orgánicos dependen en gran medida de las políticas públicas, del apoyo institucional e inversiones en infraestructuras adecuadas que la soporten. Los programas que incluyen entrega de composteras, capacitaciones, incentivos y marcos normativos presentan mayores probabilidades de éxito y continuidad en comparación con iniciativas aisladas.

El relevamiento de programas y políticas públicas en Argentina evidencia la existencia de múltiples iniciativas orientadas a la gestión de residuos orgánicos, tanto a nivel local como provincial y nacional. Estas iniciativas abarcan desde programas municipales de compostaje domiciliario y comunitario hasta planes nacionales de gestión integral de residuos sólidos urbanos (GIRSU) y proyectos de valorización energética mediante biogás.

Los programas que cuentan con apoyo institucional —a través de entrega de composteras, capacitación, incentivos y marcos normativos— presentan mayores probabilidades de éxito y continuidad en el tiempo, en comparación con iniciativas aisladas que dependen exclusivamente del esfuerzo ciudadano. En este sentido, el relevamiento se orienta no solo a identificar prácticas de compostaje, sino también a evaluar las posibilidades reales que tienen los vecinos para implementar y sostener estas prácticas en el marco de políticas públicas activas. El análisis de los casos muestra que muchos programas enfrentan limitaciones vinculadas a la educación ambiental, la continuidad política y la falta de obligatoriedad en la separación en origen. En algunos casos, la implementación se encuentra en marcha, pero con barreras relacionadas con la capacitación ciudadana o con la ausencia de mecanismos de fiscalización que aseguren resultados sostenibles en el tiempo.

La Tabla 1 resume los principales programas identificados, organizados según su alcance, tipo de aplicación y barreras detectadas.

Tabla 1. Programas de gestión de residuos orgánicos en Argentina

| **Municipio / Provincia** | **Programa / Aplicación** | **Estrategia principal** | **Estado / Barreras** | **Referencias** |
|---|---|---|---|---|
| Bahía Blanca (Buenos Aires) | Ecopunto | Compostaje comunitario con puntos de acopio y capacitación | Activo | (*Programa Bahía Blanca*, n.d.) |
| El Trébol (Santa Fe) | Compostaje domiciliario | Incentivo para compostar en el hogar con talleres educativos | Barrera: Educación | (*Compostaje El Trébol*, n.d.) |
| San Miguel de Tucumán | Ecopunto | Predio de acopio y compostaje comunitario | Barrera: Educación | (*San Miguel de Tucumán*, 2024) |
| Córdoba (Córdoba) | Campaña domiciliaria | Separación de orgánicos y difusión de beneficios ambientales | Barrera: Educación – Política | (‘Residuos - Córdoba’, n.d.) |
| Berazategui (Buenos Aires) | Compostaje domiciliario | Entrega de composteras y capacitaciones | Barrera: Educación | (*Compostaje – Berazategui*, n.d.) |
| Lomas de Zamora (Buenos Aires) | Compostaje domiciliario | Distribución de tachos y talleres de compostaje | Barrera: Educación | (*Compostaje - Lomas de Zamora*, n.d.) |
| Córdoba (Córdoba) | Programa provincial | Capacitaciones y beneficios para hogares que compostan | Barrera: Educación | (*Compostar - Córdoba*, n.d.) |
| Nación (Plan GIRSU) | Nacional | Inversión en equipamiento y eliminación de basurales a cielo abierto | Activo | (*Plan GIRSU*, 2020) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Buenos Aires (provincia) | Reconversión de basurales | Proyectos de infraestructura y rellenos controlados | Activo | (*Saneamiento y Reconversión de Basurales - BA*, n.d.) |
| Córdoba / Santa Fe / San Luis / Mendoza / Río Negro / Neuquén | Plan GIRSU provincial | Planes provinciales de gestión integral de RSU, incluyendo orgánicos | En marcha, con limitaciones | ('GIRSU - Cba', 2025; *GIRSU - NQN*, n.d.; *GIRSU - Río Negro*, n.d.; *Ambiente*, n.d.; *GIRSU - SL*, n.d.; *Residuos Sólidos Urbanos : DGFA*, n.d.) |
| Nación (Plan Erradicación de Basurales) | Nacional | Cierre de vertederos, construcción de complejos y valorización | Activo | (*Basurales a cielo abierto*, 2020) |
| Nación (PROVO) | Nacional | Programa Nacional de Valorización de Orgánicos (incluye compostaje institucional) | Activo | (*Valorización de orgánicos - PROVO*, 2022) |
| Córdoba y Nación | Valorización energética | Proyectos de biogás a partir de fracción orgánica de RSU | Activo | (*Plantas de biogás*, 2022, 2023) |

Estos programas muestran una gran heterogeneidad en cuanto a diseño, recursos y nivel de implementación. Mientras que algunos municipios como Bahía Blanca o El Trébol han logrado avances concretos en la sensibilización y capacitación de la ciudadanía, otros programas de alcance nacional (*Basurales a cielo abierto*, 2020; *Plan GIRSU*, 2020) presentan mayores desafíos de coordinación y fiscalización.

Asimismo, las experiencias vinculadas a la valorización energética (biogás) en Córdoba y otros territorios reflejan un potencial importante de aprovechamiento, aunque todavía no se han masificado.

La adopción generalizada del compostaje podría reducir aproximadamente 3,36 millones de toneladas de $CO_2$ equivalente ($TnCO_2eq$) por año, lo que equivale a las emisiones anuales de más de 700.000 vehículos particulares. Esta reducción representa un beneficio ambiental significativo y refuerza el potencial del compostaje como herramienta clave para mitigar el cambio climático y optimizar la gestión de residuos orgánicos en Argentina.

En conclusión, el panorama nacional evidencia una clara voluntad institucional por incorporar la gestión de orgánicos en la agenda ambiental, pero persisten barreras estructurales y culturales que requieren mayor continuidad, coordinación entre niveles de gobierno y campañas de educación ambiental sostenidas.

## 4. DISCUSIÓN

El análisis de programas nacionales e internacionales evidencia que la gestión de residuos orgánicos en Argentina enfrenta una serie de desafíos estructurales y culturales, pero también abre oportunidades importantes de mejora y escalamiento.

### Desafíos frecuentes

- Baja adopción en hogares: menos del 10 % de los encuestados realiza compostaje de manera regular.
- Limitaciones de espacio: especialmente en áreas urbanas densas, donde los hogares carecen de patios o jardines.
- Falta de conocimiento práctico: errores en la proporción de materiales, falta de aireación o humedad adecuada generan malos resultados, olores y abandono de la práctica.

- Déficit de información accesible y difusión: si bien existen instructivos y catálogos, no hay mecanismos de comunicación claros para que la ciudadanía sepa cómo participar ni a quién acudir.
- Desinformación y trabajo aislado: las campañas muchas veces se presentan como acciones puntuales de marketing político, sin continuidad en el tiempo ni articulación con otras políticas públicas.
- Falta de políticas obligatorias: no existen normativas que exijan la separación en origen ni mecanismos que aseguren la incorporación del compostaje en la gestión municipal.
- Problemas de sostenibilidad institucional: los cambios de gestión gubernamental interrumpen programas iniciados, lo que limita su impacto en el largo plazo.
- Falta de infraestructura: la implementación de medidas colectivas que incentiven a los hogares a separar sus RSU y disponer los residuos orgánicos en puntos de acopio comunes, requiere de inversiones en infraestructura por parte del gobierno para garantizar la correcta clasificación, el transporte diferenciado y su posterior tratamiento mediante procesos de compostaje municipal o generación de biogás. La carencia de estas instalaciones básicas desincentiva la participación ciudadana, limita la escala de los proyectos y retrasa la consolidación de un sistema de gestión integral de residuos.

**Oportunidades identificadas**

- Guías y materiales disponibles: existen manuales prácticos como los del Ministerio de Ambiente de la Provincia de Buenos Aires, que pueden ser escalados a nivel nacional.
- Respaldo institucional: programas que incluyen capacitación, entrega de composteras y formación de promotores ambientales han mostrado ser efectivos para sensibilizar a la población.
- Integración en la economía circular: el compostaje produce abono local, mejora la calidad del suelo, reduce la presión sobre rellenos sanitarios y fortalece conductas ambientales responsables.
- Potencial de valorización energética: proyectos de biogás en Córdoba y a nivel nacional muestran que la fracción orgánica también puede contribuir a la transición energética.
- Incentivos a los hogares: la implementación de beneficios económicos o reducción de tasas municipales para quienes separen y gestionen sus residuos puede estimular la participación ciudadana.

**Líneas futuras de investigación:**

- Educación y participación temprana: la inclusión de niños y jóvenes en proyectos escolares y comunitarios de compostaje puede generar un efecto multiplicador en la adopción de prácticas sostenibles en el hogar. Experiencias internacionales muestran que los programas educativos en escuelas fortalecen la conciencia ambiental y contribuyen a la continuidad intergeneracional de las políticas de gestión de residuos.
- Innovación y herramientas digitales: a futuro, el desarrollo de una aplicación móvil podría facilitar el acceso a información práctica sobre compostaje, geolocalizar puntos de acopio y conectar a ciudadanos interesados en reducir sus residuos orgánicos, promoviendo así la colaboración entre hogares, municipios y comunidades.

La Tabla 2 resume las principales propuestas en base a estos hallazgos.

Tabla 2. Propuestas

| Eje | Propuesta concreta |
|---|---|
| Difusión y formación | Organizar talleres locales (virtuales o presenciales) explicando cómo compostar, con materiales gráficos accesibles. |
| Facilitar el inicio | Distribuir biotachos o composteras en barrios, acompañados de campañas de sensibilización. |
| Participación comunitaria | Promover experiencias de compostaje colectivo en manzanas o barrios, inspiradas en redes ya existentes (ej. ambiente.gba.gob.ar). |
| Concientización y medición | Realizar campañas sobre los beneficios (reducción de residuos, menor huella de metano, obtención de abono gratuito) y encuestas periódicas para evaluar avances. |
| Incentivos gubernamentales | Proponer incentivos fiscales o beneficios que puedan ser otorgados a la población para motivar en la separación de los RSU en el hogar. |

## 4. CONCLUSIONES

La gestión de residuos orgánicos en Argentina enfrenta desafíos significativos relacionados con la falta de continuidad institucional, la escasa adopción en hogares y la limitada educación ambiental. Sin embargo, también ofrece oportunidades clave para reducir el impacto ambiental y avanzar hacia un modelo de economía circular.

Con una generación diaria estimada de 25 mil toneladas de residuos orgánicos, el compostaje se presenta como una estrategia efectiva y accesible, capaz de reducir hasta un 65 % de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a esta fracción y de aliviar la presión sobre los vertederos. Su adopción masiva permitiría transformar un problema ambiental en una fuente de valor, generando abono de calidad, reduciendo costos logísticos y fomentando conductas ambientales responsables.

Los resultados de este estudio muestran que la educación ambiental, la concientización ciudadana y el respaldo institucional son condiciones necesarias para escalar el compostaje domiciliario en el país. Asimismo, se destaca la necesidad de políticas públicas sostenidas que promuevan la separación en origen, ofrezcan incentivos a los hogares y garanticen la continuidad de los programas más allá de los cambios de gestión gubernamental.

En conclusión, el compostaje no solo constituye la estrategia central propuesta en este trabajo, sino también una herramienta fundamental para combatir el cambio climático desde los hogares argentinos. La integración de esta práctica en planes locales y nacionales puede convertir la gestión de residuos orgánicos en un motor de sostenibilidad ambiental y social, con impactos positivos tanto a corto como a largo plazo.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al financiamiento otorgado por la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, a través de su impulso a los Proyectos de Investigación y Desarrollo (PID). Agradecemos profundamente su apoyo, que ha sido fundamental para el desarrollo de este estudio

## 6. REFERENCIAS.

ACCIONA. (2024). *Vertederos, un serio problema para el medio ambiente*. https://www.sostenibilidad.com/medio-ambiente/vertederos-serio-problema-medio-ambiente/

*Basurales a cielo abierto*. (2020, September 15). Argentina.gob.ar. https://www.argentina.gob.ar/interior/ambiente/accion/basurales

Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, *100*(22), 5444–5453. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027

*Biogas*. (2022, September 1). Argentina.gob.ar. https://www.argentina.gob.ar/noticias/plantas-de-biogas-crece-la-valorizacion-de-los-residuos-agropecuarios-y-agroindustriales

California, S. of. (2024). *California's Short-Lived Climate Pollutant Reduction Strategy*. CalRecycle Home Page. https://calrecycle.ca.gov/organics/slcp/

*China Waste Turn Into Fertilizer | GGT*. (n.d.). China Waste Turn Into Fertilizer | GGT. Retrieved 25 August 2025, from https://www.ggt-tokobo.com/china-waste-turn-into-fertilizer/

City of Melbourne. (2024). *City of Melbourne's Compost Revolution | Home*. https://compostrevolution.com.au/melbourne/

*Compostaje – Berazategui*. (n.d.). Retrieved 21 August 2025, from https://berazategui.gob.ar/noticias/invitan-a-sumarse-al-proyecto-municipal-de-compostaje/?utm_source=chatgpt.com

*Compostaje El Trébol*. (n.d.). Municipalidad de El Trébol. Retrieved 21 August 2025, from https://eltrebol.gov.ar/compostaje/

*Compostaje—Lomas de Zamora*. (n.d.). Retrieved 21 August 2025, from https://www.ambiente.gba.gob.ar/noticias/daniela_vilar_present%C3%B3_el_programa_provincial_de_compostaje_en_lomas_de_zamora?utm_source=chatgpt.com

*Compostar—Córdoba*. (n.d.). Retrieved 21 August 2025, from https://ambiente.cba.gov.ar/compostar-una-practica-sustentable-para-cuidar-el-ambiente/

Environment, U. N. (2024, February 25). *UNEP*. https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024

EPA. (2016). *Documentation for the Waste Reduction Model (WARM) | US EPA*. https://www.epa.gov/warm/documentation-waste-reduction-model-warm

Ermolaev, E., Sundberg, C., Pell, M., & Jönsson, H. (2014). *Greenhouse gas emissions from home composting in practice*. *151*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.049

Faverial, J., & Sierra, J. (2014). Home composting of household biodegradable wastes under the tropical conditions of Guadeloupe (French Antilles). *Journal of Cleaner Production*, *83*, 238–244. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.068

GIRSU - Cba. (2025, January 16). *Gobierno de Córdoba*. https://www.cba.gov.ar/ambiente-avanza-con-la-cicatrizacion-de-basurales-en-el-interior-provincial/

*GIRSU - NQN*. (n.d.). Neuquen Informa. Retrieved 21 August 2025, from https://www.neuqueninforma.gob.ar/noticias/2025/05/20/249414-impulsan-un-plan-provincial-junto-a-municipios-para-fortalecer-la-gestion-de-residuos

*GIRSU - Río Negro*. (n.d.). Retrieved 21 August 2025, from https://rionegro.gov.ar/programa/186/girsu

*GIRSU - SF*. (n.d.). Retrieved 21 August 2025, from https://www.santafe.gov.ar/noticias/noticia/283121/?utm_source=chatgpt.com

*GIRSU - SL*. (n.d.). ANSL. Retrieved 21 August 2025, from https://agenciasanluis.com/2024/12/11/1012776-ocho-municipios-erradicaron-basurales-a-cielo-abierto/

Iglhau, C. (2023, June 21). *Así reduce Alemania el desperdicio de alimentos y los residuos plásticos*. https://www.deutschland.de/es/topic/medio-ambiente/asi-reduce-alemania-el-desperdicio-de-alimentos-y-los-residuos-plasticos

INCLAM. (2013, December 12). El compostaje receta para reducir la huella de carbono en España. *Amigos de la Tierra*. https://www.tierra.org/el-compostaje-receta-para-reducir-la-huella-de-carbono-en-espana/

INDEC. (2019). *INDEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina*. https://www.indec.gob.ar/

*Inventario GEI*. (2020, May 29). Argentina.gob.ar. https://www.argentina.gob.ar/ambiente/Desarrollo-Sostenible-y-Gesti%C3%B3n-Clim%C3%A1tica/inventario-nacional-de-gases-de-efecto-invernadero

IPCC. (2014). *Español—IPCC*. https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/

Joaquín. (2023, May 8). *Biogas—Cba*. https://www.lavoz.com.ar/agro/actualidad/cordoba-ocupa-el-segundo-lugar-en-produccion-de-biogas/

*Kerala State Planning Board*. (n.d.). Retrieved 25 August 2025, from https://spb.kerala.gov.in/en/decentralised-planning-division

Ley 7/2022, Pub. L. No. Ley 7/2022, BOE-A-2022-5809 48578 (2022). https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7

MasAzul. (2021, September 7). Suecia acaba con la basura. *Mas Azul Planeta*. https://www.masazulplaneta.com.ar/2021/09/07/suecia-acaba-con-la-basura/

MAyDS. (2021). *Cuarto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC)*. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2022/01/4to_informe_bienal_de_la_republica_argentina.pdf

MAyDS. (2023). *Quinto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).* https://unfccc.int/sites/default/files/resource/5to%20Informe%20Bienal%20de%20Actualizaci%C3%B3n%20de%20la%20Rep%C3%BAblica%20Argentina.pdf

Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible. (2021). *Gobernador de la Provincia de Buenos Aires*.

Palimaru, A. I., Fleming, J., Balagna, J., Agmon, M., Robbins, M., & Hunter, S. B. (2022). *Los Angeles County's Preparedness for California's Edible Food Recovery Mandate (SB 1383): An Examination of Food Recovery Logistics and Other Challenges*. RAND Corporation. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA1983-1.html

PANORAMA. (2020). *Promoviendo el Compostaje Descentralizado: Proyecto Ferias y Jardines Sostenibles | PANORAMA*. https://panorama.solutions/es/solution/promoviendo-el-compostaje-descentralizado-proyecto-ferias-y-jardines-sostenibles

*Plan GIRSU*. (2020, September 22). Argentina.gob.ar. https://www.argentina.gob.ar/interior/ambiente/erradicacion-de-basurales

*Programa Bahía Blanca*. (n.d.). Retrieved 21 August 2025, from https://www.bahia.gob.ar/composterascomunitarias/?utm_source=chatgpt.com

*Residuos Sólidos Urbanos: DGFA*. (n.d.). Retrieved 21 August 2025, from https://www.mendoza.gov.ar/dpa/residuos-solidos-urbanos/

Residuos—Córdoba. (n.d.). *Ambiente Municipalidad de Córdoba*. Retrieved 21 August 2025, from https://ambiente.cordoba.gob.ar/residuos/

RETEMA. (2019). *Sacyr inaugura en Melbourne su primera planta de tratamiento de residuos en Australia | RETEMA*. https://www.retema.es/actualidad/sacyr-inaugura-melbourne-su-primera-planta-tratamiento-residuos-australia

Roger. (2022, November 21). ¿Cómo afrontar el nuevo impuesto al plástico? *Controlpack*. https://www.controlpack.com/blog/noticias/como-afrontar-nuevo-impuesto-plastico/

Sacyr. (2024). *Planta de Tratamiento y Valorización Energética de Residuos de Mataró—Sacyr Infraestructuras—Lrcertpro74.sacyr.com*. Sacyr Infraestructuras. https://www.sacyrinfraestructuras.com/planta-de-tratamiento-y-valorizacion-energetica-de-residuos-de-mataro

*San Miguel de Tucumán*. (2024, October 25). Ciudad San Miguel de Tucumán. https://comunicacionsmt.gob.ar/contenido/6450/nace-el-programa-composta-para-reciclar-los-residuos-verdes-de-san-miguel-de-tuc

Sánchez, G., & Gabriel, G. (2014). *Biblioteca Digital UNCUYO - Del Sistema Integrado de Documentación—UNCUYO*. https://bdigital.uncu.edu.ar/

*Saneamiento y Reconversión de Basurales—BA*. (n.d.). OPDS - Autoridad Ambiental. Retrieved 21 August 2025, from https://www.ambiente.gba.gob.ar/ruec/saneamiento

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2019). *Datos Argentina—Acceso al Inventario Nacional de Gases de efecto invernadero de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable*. https://datos.gob.ar/

The Circular LAb. (2017, May 10). *Un país ejemplar en reciclaje: Suecia, ¿Cómo lo ha conseguido?* https://www.thecircularlab.com/pais-ejemplar-en-reciclaje/

UN Habitat. (2015). *Advancing organic waste composting in São Paulo, Brazil | Urban Agenda Platform*. https://www.urbanagendaplatform.org/best-practice/advancing-organic-waste-composting-sao-paulo-brazil

*Valorización de orgánicos—PROVO*. (2022, May 5). Argentina.gob.ar. https://www.argentina.gob.ar/interior/ambiente/evaluaci%C3%B3n-y-control-ambiental/valorizacion-de-organicos

Vicejefatura de Gabinete del Interior. (2019a, July 19). *Etapas de la gestión integral de residuos sólidos urbanos*. Argentina.gob.ar. https://www.argentina.gob.ar/interior/ambiente/control/rsu/etapas

Vicejefatura de Gabinete del Interior. (2019b, July 19). *Gestión de residuos sólidos urbanos*. Argentina.gob.ar. https://www.argentina.gob.ar/interior/ambiente/control/rsu

Wilson, D. C., Rodic, L., Modak, P., Soos, R., Carpintero, A., Velis, K., Iyer, M., & Simonett, O. (2015, September 8). *Global Waste Management Outlook* [Monograph]. UNEP. http://web.unep.org/ourplanet/september-2015/unep-publications/global-waste-management-outlook

# Evaluación de un Modelo de Invernadero Inteligente para Lograr Producción Sustentable y Competitiva – Enfoque en Procesos para la Automatización de un Emprendimiento de Huerta Hidropónica

Santamaría, Felipe; Gorostiaga, Miguel; Sacco, Alfonso Víctor; Cavacini, Antonella

*Facultad de Ingeniería, Universidad del Salvador*
felipe.santamaria@usal.edu.ar ; gorostiaga.miguel@usal.edu.ar ;
alsacco@usal.edu.ar ; antonella.cavacini@usal.edu.ar

**RESUMEN**

El presente trabajo de Investigación tiene como objetivo analizar la factibilidad y escalabilidad de un sistema de cultivo urbano inteligente con técnica de hidroponía, que logre sustentabilidad y competitividad, para ello se estudiaran profundamente los esquemas de invernaderos tradicionales determinando las necesidades de optimización y mejoras que tiendan a una producción hortícola consistente y de alto rendimiento.

Con este propósito, se verificarán las variables relevantes que inciden en el proceso productivo con el objeto de controlar y ajustar sus desempeños, proponiéndose una solución tecnológica independiente de intervención humana. Se buscará incorporar tecnologías de alta disponibilidad y bajo costo, del tipo TICs, tales como Internet de las Cosas (IoT), Energía Renovable, Big Data Analítica, Redes Neuronales, Sistemas Expertos e Inteligencia Artificial (AI), que aseguren desempeño y eficiencia.

Pregunta de Investigación: ¿Se puede ganar en Productividad y Sustentabilidad en el negocio huerta hidropónica incorporando tecnología de control inteligente sobre las variables críticas de proceso?

Se analizará la literatura que trata al respecto, verificando su adaptabilidad a nuestro ámbito; para luego proponer la adopción de esquemas de monitoreo de variables, análisis de datos, sistemas de control y toma de decisiones autónomas. Todo ello con el objeto de evidenciar las vinculaciones existentes entre la Automatización Inteligente y la Sustentabilidad Productiva teniendo en cuenta las relaciones Costo-Beneficio que justifiquen su adopción.

**Palabras Claves:** Hidroponía - Parámetros Ambientales - Monitoreo de la Salud de las Plantas - Control Autónomo.

**ABSTRACT**

This research aims to analyze the feasibility and scalability of a smart urban hydroponic cultivation system that achieves sustainability and competitiveness. To this end, traditional greenhouse systems will be thoroughly studied, determining the needs for optimization and improvements that lead to consistent, high-yield horticultural production.

To this end, the relevant variables that influence the production process will be verified in order to control and adjust their performance, proposing a technological solution independent of human intervention. We will seek to incorporate high-availability and low-cost ICT technologies, such as the Internet of Things (IoT), Renewable Energy, Big Data Analytics, Neural Networks, Expert Systems, and Artificial Intelligence (AI), to ensure performance and efficiency.

Research Question: Can productivity and sustainability gains be achieved in the hydroponic garden business by incorporating intelligent control technology for critical process variables?

We will analyze the relevant literature, verifying its adaptability to our field, and then propose the adoption of variable monitoring schemes, data analysis, control systems, and autonomous decision-making. All of this is done with the aim of demonstrating the existing links between Intelligent Automation and Productive Sustainability, taking into account the cost-benefit ratios that justify its adoption.

**Keywords**: Hydroponics - Environmental Parameters - Plant Health Monitoring - Autonomous Control.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Abordaje a la Temática de la Producción Sustentable Mediante Hidroponía

La producción sustentable de alimentos es uno de los principales retos de la ingeniería en el siglo XXI, especialmente frente al crecimiento poblacional, la urbanización acelerada y la escasez de recursos hídricos. En este contexto, la hidroponía se posiciona como una técnica agrícola innovadora que permite cultivar vegetales sin suelo, utilizando soluciones nutritivas en entornos controlados. Esta modalidad presenta ventajas sustanciales en eficiencia hídrica, aprovechamiento del espacio, reducción del impacto ambiental e independencia de las condiciones climáticas estacionales.

Desde la perspectiva de sustentabilidad, la hidroponía contribuye a disminuir la degradación del suelo, permite cultivos en áreas urbanas o improductivas, y habilita una producción más intensiva y permanente. No obstante, su operación requiere una gestión técnica precisa y constante de múltiples variables que influyen directamente en el crecimiento vegetal y en la salud del cultivo.

El control manual/artesanal (realizado por personas) de estas variables, a menudo resulta impreciso, inoportuno, ineficiente e infundado; resultando en pérdidas de cosecha y en costos improductivos de energía, nutrientes y mano de obra; visualizándose a partir de ello, que existe una verdadera oportunidad para mejorar el desempeño, a través de un estudio que tienda a validar la incorporación de tecnología de automatización que evite la aparición de tales problemas.

El presente proyecto propone un modelo productivo innovador alineado con los principios de Empresa de Triple Impacto, combinando beneficios económicos -mayor rentabilidad y rápido retorno de la inversión-, sociales -generación de empleo calificado y acceso a alimentos saludables-, y ambientales -optimización del uso del agua y energía, y reducción de la huella ecológica-.

### 1.2. Contexto y Motivación de la Investigación

La gestión manual o semi-automatizada de estos sistemas puede volverse ineficiente ante cambios súbitos o interacciones complejas entre variables y pueden incluso limitar el potencial de volumen producido. En este punto, la aplicación de la Inteligencia Artificial (IA) ofrece una oportunidad transformadora para la agricultura sin suelo al permitir el análisis predictivo, la detección temprana de anomalías y la toma de decisiones autónoma. En base a la incorporación de indicadores e instrumentos de medición para la toma de datos operativos, la IA puede potenciar la capacidad de respuesta de los sistemas hidropónicos, reducir desperdicios y maximizar rendimientos.

Esta investigación se enmarca en un enfoque de ingeniería industrial orientado a la optimización de procesos productivos mediante herramientas digitales avanzadas. La motivación principal es explorar cómo las técnicas de IA pueden ser integradas de manera efectiva a sistemas de cultivo hidropónico con el objeto de incrementar su eficiencia en los ámbitos económico, técnico y ambiental.

### 1.3. Objetivo de la Investigación

El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto de la incorporación de un sistema basado en Internet de las Cosas (IOT) y algoritmos de Inteligencia Artificial en un sistema hidropónico existente, en términos teóricos, buscando la automatización de los mismos, con énfasis en la mejora del control de variables críticas, la eficiencia en el uso de recursos y la toma de decisiones autónomas. Se busca demostrar que la IA, combinada con principios de ingeniería industrial que estimulan la visión de la hidroponía como un proceso productivo que genera salidas de valor, puede transformar su desempeño en un sistema virtuoso altamente optimizado, resiliente y sostenible.

### 1.4. Marco Teórico

La hidroponía, es una técnica de cultivo de carácter milenaria, sin embargo la ciencia detrás del cultivo moderno sin suelo se desarrolló a partir del siglo XIX, al descubrirse la importancia que las soluciones nutritivas tienen en el resultado del proceso productivo. Métodos y técnicas que han ido evolucionando en las últimas décadas debido a los avances tecnológicos, la necesidad de producir alimentos con menos recursos y el avance de la urbanización.

En la hidroponía las plantas se desarrollan mediante soluciones nutritivas disueltas en agua, las cuales contienen todos los elementos esenciales para su crecimiento. Este sistema requiere un control preciso de variables como el pH, la conductividad eléctrica, la temperatura y el oxígeno disuelto, lo que mejora la eficiencia del uso de recursos y maximiza la productividad de los cultivos (Rahman, 2024).

Por lo tanto, la operación eficiente del sistema de producción hidropónico debe contemplar la gestión de esas múltiples variables físico-químicas, ambientales y operativas, las cuales inciden directamente en el crecimiento y salud de las plantas y en la eficiencia del uso de recursos intervinientes.

Se ha demostrado que el manejo y control riguroso de tales variables permite obtener mejoras significativas de desempeño respecto a los sistemas de cultivo en suelo tradicional, en la Tabla 1 – "Indicadores Clave de Mejora de la Hidroponía por sobre la Horticultura Tradicional" se aprecia tales consideraciones (Shamim Ahamed S. K., 2025).

Se debe destacar que, el objeto central de la presente investigación no será lograr la mejora mediante incorporación de tecnología como fin en sí mismo, sino la integración de esas tecnologías con el medio ambiente y con el usuario. De tal manera que interrelacionados puedan desarrollar un producto sustentable a un costo asequible y con un control de proceso autónomo que lo independiza de la intervención humana. Esto permite escalar, estandarizar y automatizar la producción con una lógica de mejora continua, reduciendo desperdicios y asegurando un producto de calidad homogénea.

*Tabla 1 – Indicadores Clave de Mejora de la Hidroponía por sobre la Horticultura Tradicional.*

| Indicador | Cultivo Tradicional | Hidroponía | Mejora Estimada |
|---|---|---|---|
| **Uso de agua por ciclo** | 85–100 L | 2–5 L | ~95% menos agua |
| **Tiempo hasta la cosecha (lechuga)** | 30–45 días | 20–25 días | 30–50% más rápido |
| **Producción por m² (anual)** | 3–4 kg/m² | 12–15 kg/m² | 3–4 veces más |
| **Uso de fertilizantes** | 100% | 40–60% | Reducción de 40–60% |
| **Incidencia de plagas** | Alta | Baja | Menor uso de pesticidas |
| **Espacio requerido** | Extensivo | Compacto / vertical | Mayor densidad de cultivo |
| **Costo por kg producido** | Moderado | Variable (menor a largo plazo) | Más eficiente en alta escala |
| **Estacionalidad** | Dependiente del clima | Producción todo el año | Ciclo continuo |

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Hipótesis Adoptadas

La puesta a punto de este proyecto plantea adaptar un invernadero hidropónico existente, de manera de automatizarlo y elevar su complejidad aplicando la tecnología de sensores y análisis de datos a su estructura y a sus procesos. La ponencia apunta a verificar si la propuesta refleja un resultado positivo con un beneficio medible y efectivo para el productor, en términos de volumen productivo y de calidad de procesos. Para el análisis de la problemática planteada se formulan las siguientes Hipótesis:

**Hipótesis 1:** La incorporación de tecnologías de alta disponibilidad y bajo costo, como el Internet de las Cosas (IoT), Energía Renovable, Big Data Analítica, Redes Neuronales, Sistemas Expertos e Inteligencia Artificial (AI), mejorará significativamente la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de cultivo hidropónico.

**Hipótesis 2:** La automatización de los procesos de cultivo hidropónico mediante el uso de sensores y sistemas de control autónomos reducirá la necesidad de intervención humana, permitiendo un control más preciso de las variables críticas del proceso y, por ende, una producción más consistente y de alto rendimiento.

**Hipótesis 3:** La implementación de un sistema de monitoreo y análisis de datos en tiempo real permitirá detectar y corregir anomalías de manera temprana, optimizar el uso de recursos y mejorar la sostenibilidad y competitividad del negocio de huerta hidropónica.

Estas hipótesis se pueden resumir en tratar de dar respuesta a la Pregunta de Investigación: **¿Se puede ganar en Productividad y Sustentabilidad en el negocio huerta hidropónica incorporando tecnología de control inteligente sobre las variables críticas de proceso?**

### 2.2. Caracterización de las Variables Críticas de Proceso (VCP)

Para poder alcanzar altos niveles de Productividad y Sustentabilidad se hace necesario establecer la siguiente secuencia: 1) Identificar y caracterizar las variables denominadas inductoras o de causa que inciden en forma relevante en el proceso productivo, 2) Definir las condiciones de contorno y equilibrio que para las mismas establece la literatura,3) Proceder a su medición, 4) Efectuar su control autónomo, y 5) Medir los resultados y calibrar.

En los sistemas de cultivo hidropónico, se deben considerar dos tipos fundamentales de variables. Por un lado están aquellas llamadas genéricamente Químicas, que consideran las características que deben cumplir los nutrientes requeridos por las plantas y que son suministrados a través de una solución acuosa o solución nutritiva. Y por otro, están las variables llamadas Físicas que deben gobernar el entorno para asegurar el crecimiento, la salud y el rendimiento de las plantas.

En este sentido se detallan a continuación las VCP que han sido consideradas para esta investigación.

### 2.2.1. Variables Químicas

Las propiedades químicas del agua adquieren un rol central, ya que cualquier desviación respecto a los valores óptimos puede impactar negativamente en el crecimiento vegetal, la absorción de nutrientes y el equilibrio general del sistema, según el estadio. El control de estas variables resulta indispensable para asegurar la calidad y la salud productiva del sistema hidropónico (Chaudhary, 2025). A continuación se detallan las Variables Químicas que han sido consideradas como más relevantes:

**Potencial de Hidrógeno (pH):** El pH determina el nivel de acidez o alcalinidad de la solución nutritiva. Este parámetro condiciona la disponibilidad de los nutrientes disueltos, influyendo en la capacidad de absorción por parte de las raíces. Variaciones fuera del rango adecuado pueden provocar bloqueos nutricionales, toxicidades o desequilibrios fisiológicos en las plantas (Ibrahim, 2023). Se recomienda realizar esta medición diariamente.

**Conductividad Eléctrica (EC):** La conductividad eléctrica representa la concentración total de sales disueltas en la solución nutritiva. Constituye un indicador indirecto de la disponibilidad de macro y micronutrientes. Un valor bajo puede estar asociado a deficiencias nutricionales, mientras que valores elevados pueden generar estrés osmótico o acumulación de sales, una CE baja afecta el crecimiento y el rendimiento (Chaudhary, 2025). Este parámetro se mide en unidades de milisiemens/cm mediante un conductímetro, y se recomienda su ejecución diaria.

**Oxígeno Disuelto (DO):** El oxígeno disuelto es esencial para la respiración celular de las raíces. La insuficiencia de oxígeno en el medio acuático puede favorecer condiciones anaeróbicas y generar procesos de fermentación o degradación orgánica. La concentración de oxígeno disuelto se relaciona con la temperatura, el movimiento del agua y la carga orgánica del sistema (Ibrahim, 2023). Se sugiere mantener valores de entre 3 a 10 mg/L, preferencialmente 6 mg/L

**Solución Nutricional (Composición de Nutrientes):** Las plantas hidropónicas obtienen todos sus nutrientes de la solución, a diferencia del suelo, dichos nutrientes esenciales para la mayoría de las plantas en hidroponía son 17 elementos, de los cuales carbono y oxígeno se obtienen de la atmósfera, y el resto (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, cobre, zinc, manganeso, molibdeno, boro, cloro y níquel) deben ser suministradas al del medio de crecimiento por el productor.

Algunas soluciones nutritivas básicas incluyen solo nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, complementados con micronutrientes. La reacción de la planta a una buena nutrición es rápidamente evidente, por lo que el cultivador debe observar las plantas mediante un control diario y metodológico (Malabadi R. B., 2024). Estos macro y micro nutrientes deben ser incluidos mediante provisión de compuestos más complejos que cuenten en su composición con los elementos antes mencionados.

### 2.2.2. Variables Físicas

Las condiciones del entorno y ambiente hidropónico son determinantes para asegurar el desempeño de la huerta, por lo cual la observación y control de estas variables resulta indispensable para mantener la estabilidad productiva (Chaudhary, 2025) (Luwei Wang, 2024)**.** A continuación se detallan las Variables Físicas que han sido consideradas como más relevantes:

**Temperatura del Agua (Solución Nutritiva):** La temperatura del agua afecta la solubilidad de los gases, el metabolismo vegetal y la estabilidad química de los nutrientes. Este parámetro puede incidir en la velocidad de los procesos fisiológicos, así como en la susceptibilidad del sistema frente a patógenos o alteraciones en la oxigenación (Dahiya, 2025).

**Temperatura Ambiente:** La temperatura del aire ambiente contribuye a regular la fotosíntesis y el metabolismo de los cultivos, depende del tipo de planta que se cultive, pero un rango general de 18-22 °C es adecuado para muchas especies, Las temperaturas altas (por encima de 27-30 °C) reducen el oxígeno en el agua y pueden favorecer plagas y enfermedades.

**Nivel de Agua:** El nivel de agua en los sistemas hidropónicos es un parámetro que incide en la disponibilidad continua de la solución nutritiva y en el contacto adecuado con el sistema radicular. Cambios en el nivel pueden alterar la homogeneidad del suministro, afectar la presión en los sistemas de recirculación y modificar la concentración de nutrientes por evaporación o reposición inadecuada (Paul, 2022).

**Humedad Relativa Ambiente:** La humedad ambiental es vital para el crecimiento vegetal, aunque niveles de humedad excesivos pueden aumentar el riesgo de ataques de hongos y plagas, llevando a la reducción del rendimiento, es importante para evitar esto fomentar la buena circulación de aire mediante el uso de sistemas de humidificación y ventilación para tal fin.

**Intensidad de Luz:** Una intensidad de luz óptima asegura que las plantas puedan realizar la fotosíntesis de manera eficiente, produciendo los nutrientes necesarios para su desarrollo. Esto se traduce en plantas con hojas verdes, tallos fuertes y una buena estructura general. En un orden amplio se estima adecuado una intensidad de 50–350 µmol/m²·s (micromoles por metro cuadrado por segundo).

**$CO_2$ (Dióxido de Carbono) Ambiente:** Es necesario monitorear el nivel de gases de efecto invernadero como el $CO_2$., dado que el aumento del $CO_2$ potencia la fotosíntesis, mejorando el crecimiento y la calidad de las plantas, pero, un exceso de $CO_2$ puede ser perjudicial, por lo que es muy importante mantener una concentración óptima (Yegül, 2025), generalmente entre 1000 y 2000 ppm (partes por millón), y asegurar una adecuada ventilación para evitar la acumulación tóxica y facilitar el intercambio gaseoso.

Las VCP (Variables Críticas de Proceso) que han sido detalladas, serán consideradas para incorporar al diseño de control autónomo propuesto en esta investigación. En la Tabla 2 – "Variables Físico-Químicas a Controlar", se muestran las mismas con sus valores óptimos a mantener.

*Tabla 2 – Variables Físico-Químicas a Controlar*

| Variable | Valor Óptimo | Rango de Ajuste Automático |
|---|---|---|
| **pH** | 5.5 - 6.6 | 5.2 - 7.0 |
| **Conductividad Eléctrica (CE)** | 1.2 - 2.0 mS/cm | 0.8 - 2.5 mS/cm |
| **Oxígeno Disuelto (DO)** | 6 - 8 mg/L | 5 - 9 mg/L |
| **Nivel de agua** | 1 a 2 litros/minuto | <0,8 - 2,5 litros/minuto |
| **Nivel de Agua en Reservorio** | 80% | 10%-50% |
| **Temperatura del Agua** | 18 - 20 °C | 16 - 22 °C |
| **Temperatura Ambiente** | 15-22°C | 13-24°C |
| **Humedad Relativa Ambiente** | 50% y 70% | <40% - >80% |
| **Intensidad de Luz** | 50-350 µmol.m-2.s-1 | 12 a 16 hs/día |
| **$CO_2$ Ambiente** | 1,000 - 2,000 ppm | < 400 - >1500 ppm |

### 2.3. Caracterización de Indicadores Clave de Desempeño (KPI) del Proceso

Se define un indicador como la relación entre variables que permite observar la evolución de una situación y sus tendencias de cambio. Cuando se mide el desempeño previsto o resultado esperado de un proceso, ese indicador se denomina de efectos o de resultados. Y si a su vez esas variables son críticas para el éxito del proceso productivo, al indicador que las vincula se lo denomina Indicador Clave de Desempeño o KPI (del inglés Key Performance Indicator).

La identificación y el monitoreo de estos indicadores permitirá evaluar la eficiencia general del sistema productivo, destacándose para el caso en estudio, según la literatura citada, los siguientes KPIs, como ratios a considerar por Ciclo Productivo, que han sido considerados como los más relevantes:

**Consumo de Agua Especifico:** Mide la relación entre la cantidad de agua empleada y la producción resultante. Se obtiene el consumo de agua por cada unidad producida.

**Uniformidad de Crecimiento:** Mide la relación de crecimiento de las plantas en función del tiempo. Se obtiene desarrollo y evolución del peso/tamaño de las plantas, puede advertir sobre problemas de nutrición y balance.

**Pérdidas ó Descartes:** Mide la relación entre la cantidad de plantas que no llegan a cumplir con el estándar de calidad, sanidad ó desarrollo; y la totalidad del lote. Se obtiene el porcentaje de plantas que no pueden comercializarse o que presentan fallas de crecimiento, puede ser debido al exceso o falta de agua, luz o nutrientes.

**Eficiencia del Uso de Insumos:** Mide la relación entre insumos aplicados (fertilizantes, nutrientes) y el rendimiento alcanzado. Se obtiene la eficiencia del empleo de insumos en relación a lo producido en unidades de peso, buscando reducir consumos innecesarios y el costo resultante.

**Productividad por Superficie Cultivada:** Mide la relación entre el resultado de producción alcanzado (rendimiento comercial) y el área o superficie empleada dentro del invernadero. Se obtiene el rendimiento espacial del recinto, resultando la capacidad productiva de la superficie. Se busca comparar la eficiencia de distintos sistemas y cultivos, viéndose afectado por factores tales como temperatura, humedad, $CO_2$, nutrientes, densidad y modo de cultivo, etc.

Estos indicadores permiten analizar el funcionamiento general del sistema, identificar oportunidades de mejora y garantizar la estabilidad y calidad del proceso a lo largo del tiempo. En la Tabla 3 se aprecian los detalles de estos diferentes indicadores y su forma de cálculo. Con estos indicadores resultaría apropiado hacer una prueba de 3 a 4 ciclos y realizar un análisis estadistico.

*Tabla 3 – Indicadores KPI para Sistemas de Hidroponía*

| Indicador | Unidad de Medida | Método de Medición / Cálculo |
|---|---|---|
| **Consumo de Agua Especifico** | Litros/kg | Volumen total de agua consumido ÷ kg de producto cosechado |
| **Uniformidad de Crecimiento** | % Coeficiente de variación (CV) | Desviación estándar del peso/tamaño ÷ media del peso/tamaño × 100 |
| **Pérdidas ó Descartes** | % | Cantidad de plantas descartadas ÷ total de plantas cultivadas × 100 |
| **Eficiencia del Uso de Insumos** | kg insumo/kg producto | kg de fertilizante o nutriente ÷ kg de cosecha obtenida |
| **Productividad por Superficie Cultivada** | kg/m²/ciclo | Producción total (kg) ÷ área cultivada (m²) durante un ciclo completo |

### 2.4. El Sistema Hidropónico – Caracterización de la Técnica a Emplear

En la hidroponía existen distintos métodos de cultivo, entre los cuales, para su análisis tomaremos uno de los sistemas más eficientes, práctico y difundido, que es el método NFT (Nutrient Film Technique - Técnica de Película Nutritiva), en el que se distinguen tres etapas: inseminación, flotación y cultivo en canal. Las dos primeras son comunes a cualquier sistema hidropónico, pero la NFT se caracteriza por una película delgada de solución nutritiva (0.5 a 1 cm) que fluye de forma continua y recircula sobre las raíces de las plantas, ubicadas en canales levemente inclinados.

Es ideal para cultivos de raíces superficiales, como las hortalizas de hojas verdes, y permite ahorrar entre un 70% y 90% de agua comparado con métodos tradicionales (Castañares, 2020). Sin embargo, requiere control estricto del flujo; las interrupciones pueden dañar las plantas (Malabadi R. B., 2024). Para sostener las raíces se emplean sustratos accesibles y duraderos, como espuma fenólica, cáscara de coco, arcilla expandida o mezclas de turba-perlita.

La técnica NFT se destaca por recircular el exceso de solución, minimizando el desperdicio de agua y nutrientes (Sabrina Sharmin, 2025). Además, la aireación mejora la oxigenación y el bajo costo de instalación y la posibilidad de organización en varios niveles en forma vertical que permite optimizar espacio y recursos.

Sus componentes principales son canales opacos, preferentemente de material plástico del tipo PVC, PE o PP, con perforaciones para insertar las plantas. Los canales se instalan con inclinación de entre 4% y 5%; para lechuga se recomienda 1.5% (Shamim Ahamed e. a., 2023). El depósito recolecta la solución nutritiva, que circula por intervalos controlados por una bomba y temporizador, con un caudal recomendado de 1 a 2 litros/minuto (Castañares, 2020). Al ser un sistema controlado, es menos afectado por el clima (Malabadi R. B., 2024).

### 2.5. El Sistema de Control Autónomo

#### 2.5.1. Caracterización de Sensores de Condiciones Ambiente (Sensores de Causas)

En los sistemas inteligentes; sensores, microcontroladores y actuadores forman un bucle de control esencial. Los sensores capturan variables del entorno (como temperatura, pH o humedad) y

convierten esa información en señales eléctricas, que deben ser calibradas regularmente para asegurar precisión.

El microcontrolador interpreta esas señales y decide las acciones a ejecutar, funcionando como el centro lógico del sistema. Los actuadores, por su parte, responden a esas decisiones transformando energía en acciones físicas, como abrir válvulas o encender sistemas de ventilación.

La coordinación entre estos componentes permite monitoreo permanente, respuesta automática constante, y condiciones de cultivo controladas y eficientes. La Tabla 4 – "Sensores a Emplear con las Variables a Medir", resume los distintos sensores que medirán las VCP (Variables Críticas de Proceso) y su fundamentación o importancia con sus valores nominales / tolerancias considerados.

*Tabla 4 – Sensores a Emplear con las Variables a Medir*

| Sensor | Variable medida | Importancia para el sistema |
|---|---|---|
| **Sensor de pH** | Acidez/alcalinidad de la solución | El pH afecta la absorción de nutrientes. Se debe mantener entre 5.5 y 6.5 para la mayoría de los cultivos. |
| **Sensor de CE (Conductividad Eléctica)** | Concentración de sales (nutrientes) | Controla la cantidad de nutrientes disueltos. Niveles óptimos: 1.2 a 2.5 mS/cm, según el cultivo. |
| **Sensor de Oxígeno Disuelto (DO)** | Oxigenación de la solución | Fundamental para evitar hipoxia radicular. Nivel ideal: >5 mg/L. |
| **Sensor de Temperatura del Agua** | Temperatura de la solución nutritiva | Afecta el metabolismo radicular. Valores óptimos: 18–22°C. |
| **Sensor de Temperatura Ambiente** | Temperatura del invernadero | La mayoría de cultivos requieren 18–28°C. Fuera de este rango puede haber estrés térmico. |
| **Sensor de Nivel de Agua** | Nivel del tanque o depósito | Previene el funcionamiento en seco de bombas y permite mantener constante la recirculación. |
| **Sensor de Humedad relativa** | Porcentaje de humedad en el aire | Ideal entre 50–70%, según cultivo. Influye en transpiración y aparición de hongos. |
| **Sensor de Luminosidad (LDR o PAR)** | Cantidad de luz disponible | Permite activar iluminación artificial en caso de baja radiación. Asegura fotosíntesis constante. |
| **$CO_2$ Ambiente** | Nivel de gases efecto invernadero | Un nivel adecuado potencia la fotosíntesis, un exceso es perjudicial. Mantener nivel óptimo entre 1000 y 2000 ppm según cultivo. |

### 2.5.2. Caracterización de Sensores de Desempeño (Sensores de Resultados)

En relación a la necesidad de establecer indicadores KPIs de efectos o resultados, como ya fuera desarrollado ut-supra, a los efectos de permitir cerrar el ciclo de aprendizaje del sistema de control autónomo, se propone la implementación de un sensor de tasa de crecimiento y cambios morfológicos de la planta (citados como de Uniformidad de Crecimiento) del tipo WSS (Wearable Strain Sensor – Sensor de Deformación Vestible ó Portatil). Estos sensores, que se encuentran referidos en la literatura más reciente, son dispositivos ultrafinos, flexibles y biocompatibles que se adhieren al tallo, pecíolo o lámina foliar, registrando variaciones de resistencia o capacitancia producidas por la elongación y expansión de los tejidos de las plantas.

Se trata de una medición continua, no invasiva y en tiempo real del crecimiento, que proporciona un valor de referencia clave para evaluar el impacto de las variables inductoras (pH, temperatura, nutrientes, radiación, $CO_2$, etc.), permitiendo a los algoritmos de Inteligencia Artificial establecer correlaciones causa-efecto y ajustar autónomamente las condiciones del entorno para optimizar el rendimiento y la salud del cultivo.

Este tipo de sensores representan una tecnología emergente altamente prometedora para monitorear el crecimiento en tiempo real con precisión, y cada vez más apta para aplicaciones en huertas de invernadero avanzadas. Todavía se encuentran en fase de investigación, pero ya disponibles en el mercado en forma accesible.

## 2.6. Aplicación de Tecnologías Emergentes

### 2.6.1. Internet de las Cosas (IOT) e Inteligencia Artificial (AI)

Para integrar la producción hidropónica con el análisis de datos, se dispondrá de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) y de Inteligencia Artificial (AI). Estas permiten que dispositivos, sensores y microcontroladores se conecten para recopilar y transmitir información en tiempo real, así como controlar equipos de manera remota y automática (Rahman, 2024).

Por medio de algoritmos de aprendizaje automático, se analizan los datos recolectados, prediciendo y ajustando los valores óptimos de la solución nutritiva en función de las condiciones ambientales y

fisicoquímicas (Shamim Ahamed S. K., 2025). El sistema de control utiliza sensores y actuadores conectados a un microprocesador, lo que automatiza la detección de cambios y la respuesta del sistema, mejorando la eficiencia y calidad del cultivo.

Si se detecta alguna desviación de los parámetros ideales de los indicadores de resultados (por ej. Tasa y Calidad de Crecimiento), el sistema notifica al usuario y realiza ajustes automáticamente, lo que permite efectuar el control de las variables de entorno o de causa en forma temprana, ante cualquier irregularidad, y mantener la productividad y calidad del cultivo.

Establecer un Sistema de Control Autónomo en el invernadero de hidroponía implica la capacidad para medir, regular y corregir automáticamente las condiciones de contorno en función de los resultados que se presentan en el crecimiento de las plantas, volcando toda la información que registran los sensores a una unidad de procesamiento de datos, que dotada de un algoritmo de aprendizaje determinado pueda tomar decisiones informadas de control en tiempo real, dando las señales correspondientes a los actuadores del sistema, sin necesidad de intervención humana.

### 2.6.2. Diseño del Sistema de Control Autónomo

Una vez definidas las Variables Químicas y Físicas que inciden en el buen desempeño de la huerta hidropónica, se hace necesario establecer los límites de calibración de las mismas para conformar las condiciones de corrección y establecer el control correspondiente.

En la Tabla 5 –"Parámetros de Control y Actuación para Variables Físico Químicas del Sistema", se detallan las condiciones de aceptabilidad, y las acciones correctivas de control cuando los valores exceden o están por debajo del rango óptimo, dando las señales correspondientes a los actuadores implicados.

*Tabla 5 - Parámetros de Control y Actuación para Variables Físico Químicas del Sistema*

| Variable | Condición | Acción Correctiva | Actuador | Rango Óptimo |
|---|---|---|---|---|
| **pH** | Menor a 5.5 | Agregar solución alcalina | Bomba peristáltica (pH-Up) | 5.5 – 6.5 |
| | Mayor a 6.5 | Agregar solución ácida | Bomba peristáltica (pH-Down) | 5.5 – 6.5 |
| **Conductividad Eléctrica (CE)** | Menor a 1.2 mS/cm | Añadir nutrientes concentrados | Dosificador de fertilizante | 1.2 – 2.4 mS/cm |
| | Mayor a 2.4 mS/cm | Diluir con agua pura | Electroválvula de agua | 1.2 – 2.4 mS/cm |
| **Temperatura del Agua** | Menor a 18 °C | Activar calentador | Calentador sumergible | 18 – 24 °C |
| | Mayor a 26 °C | Activar sistema de enfriamiento | Ventilador / bomba de enfriamiento | 18 – 24 °C |
| **Oxígeno Disuelto** | Menor a 6 mg/L | Iniciar aireación intensiva | Bomba de aire / compresor | > 6 mg/L |
| **Nivel de Agua** | Menor a 70% | Reponer automáticamente | Bomba de reposición / electroválvula | ~80% canal |
| **Humedad Relativa** | Mayor a 70% | Activar ventilación | Ventilador extractor | 50 – 70% |
| **Temperatura Ambiente** | Mayor a 28 °C | Activar ventilación / aire acondicionado. | Ventilador o malla térmica | 20 – 28 °C |
| | Menor a 20 °C | Activar calefacción | Resistencia térmica / calefactor | 20 – 28 °C |
| **Luz (PAR)** | > 350 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ | Activar sombreo | Deslizador automático | 200 – 350 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ |
| | < 200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ | Encender LED | Luces LED Activador | 200 – 350 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ |

Este sistema puede automatizarse con sensores conectados a microprocesadores (tipo ESP32 ó Arduino) de forma tal que puedan monitorear valores a distancia y operar sobre actuadores específicos de control (Yu Bai, 2025). La integración de estos dispositivos compuestos por sensores-microprocesadores-actuadores permite automatizar entre otras funciones: riego, ventilación, iluminación, caudales de agua, temperaturas, flujos de nutrientes, y otras funciones esenciales, optimizando el rendimiento y reduciendo el consumo de recursos.

El análisis de Pareto aplicado al sistema de invernadero inteligente permite identificar las variables más críticas que afectan el rendimiento y la estabilidad del cultivo. Los resultados muestran que tres

parámetros concentran la mayor influencia sobre la calidad de la producción: pH, Conductividad Eléctrica (CE) y Oxígeno Disuelto, que en conjunto representan más del 50% del impacto total. Parámetros críticos que deben ser controlados con prioridad para evitar bloqueos nutricionales, estrés osmótico o deficiencia de oxígeno en las raíces.

En segundo orden podemos identificar factores, tales como el nivel de agua, la temperatura (del agua y del ambiente) y la humedad relativa, que suman cerca del 40% de relevancia y requieren un monitoreo constante para mantener condiciones óptimas de crecimiento.

Por último, la luz y la concentración de $CO_2$ completan el análisis, con un impacto menor pero igualmente necesario para maximizar la eficiencia del sistema. Este enfoque permite asignar recursos de control y automatización de forma más eficiente, priorizando aquellas variables que más influyen en la productividad. Esto se muestra en la Figura 1 - ·Diagrama de Impacto de Variables Críticas del Sistema".

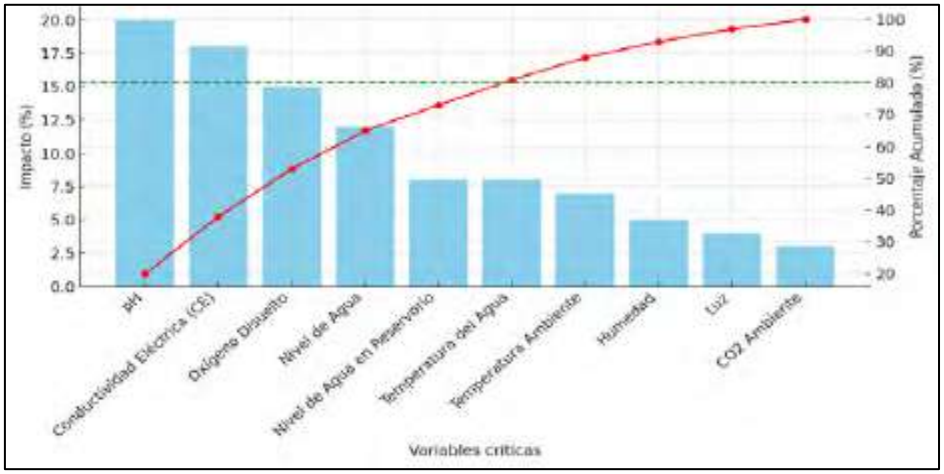



*Figura 1 – Diagrama de Impacto de variables Críticas del Sistema*

### 2.7. Estudio de Campo -Aplicación del Modelo de Invernadero Inteligente-

#### 2.7.1. Descripción Proceso Tradicional (Funcionamiento Actual)

Para comprobar la aplicación del Modelo y verificar las mejoras planteadas, se analizará un emprendimiento existente ubicado en la ciudad de Tandil que se tomará como ejemplo para mostrar cómo funciona actualmente el sistema hidropónico en su formato tradicional, y poder apreciar las oportunidades para mejorarlo mediante la incorporación de tecnologías emergentes.

Este invernadero ocupa una superficie de 18 metros de ancho y 30 metros de largo, lo que da unos 540 metros cuadrados, siendo su sistema de producción el NFT (Nutrient Film Technique). El invernadero está organizado en 10 islas, de 8 canales cada una. Cada isla se encuentra separada de la otra por una distancia de 0,7 metros, para permitir la circulación humana en su interior.

El emplazamiento cuenta con una capacidad máxima teórica para cultivar unas 6080 plantas de lechuga en forma simultánea, algo así como 80 plantas por canal y 640 por isla, organizadas en lotes que permiten una a dos cosechas semanales, de manera ininterrumpida. Sin embargo, mientras que la duración normal de cada ciclo en las estaciones de verano, otoño y primavera es de 50-55 días, en invierno es de hasta 70, lo cual conlleva una ineficiencia productiva.

El método de riego y recirculación de solución nutricional podemos separarlo en dos sistemas, cada uno asociado a un tanque principal: El primero de 2500 litros que abastece 8 islas, dispuestas en paralelo y con una longitud de 20 metros, cuenta con una bomba de 1 HP para la circulación de la solución nutricional, circuito que se nutre de agua corriente y de lluvia. El segundo tanque, de 800 litros, abastece las dos islas restantes, de 15 metros cada una, mediante una bomba más pequeña.

El agua corriente proviene del sistema de red municipal, lo que permite garantizar los parámetros de estabilidad y seguridad para la preparación de la solución nutritiva, por lo cual se evita el empleo de sistemas de filtrado avanzados. La mezcla de nutrientes para conformar la solución nutricional se realiza en los tanques principales antes mencionados, incorporándose tanto macronutrientes como micronutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas, manteniendo un pH entre 5,8 y 6,1.

En cuanto a la comercialización, la producción se destina principalmente a supermercados y restaurantes locales, lo que permite reducir las pérdidas típicas de los cultivos en zonas más

alejadas. Los trabajos y preparaciones se hacen siempre con la misma dedicación, sin embargo los niveles de productividad no son estables, asociándolo a variaciones propias del proceso o a inclemencias ambientales no predecibles, que son asumidas como normales.

El nivel de automatización del sistema actual es limitado. Sólo se observa un temporizador que regula el encendido de la bomba a razón de 15 minutos por hora, ajustándose según la temperatura diaria. La iluminación es exclusivamente natural; no hay fuentes de luz artificial. La ventilación depende de paneles laterales de nylon que se manipulan manualmente para regular la temperatura y humedad.

Respecto al monitoreo, el invernadero cuenta con sensores muy básicos de temperatura, humedad y concentración de CO2 del ambiente. La medición del pH y de los nutrientes principales (Nitrógeno/Fósforo/Potasio -NPK-) se realiza manualmente cada 2 ó 3 días. Se identifica aquí una clara oportunidad para mejorar el desempeño y la productividad, mediante la incorporación de un sistema de control de Variables Críticas de Proceso no dependiente de intervención humana.

Teniendo en cuenta las citadas condiciones de diseño del invernadero, el máximo esperado en condiciones ideales de cultivo es de 850 plantas de lechuga por semana, es decir 3400 plantas al mes, con un peso promedio de 250 gr. por planta, lo que resulta en una producción ideal de 850 kg./mes. Producción en condiciones ideales, que pudo ser alcanzada en muy pocas oportunidades en el año anterior. En general la producción real mantiene rendimientos que rondan entre 650 y 700 kg./mes, es decir que corresponde aproximadamente al 80 % de valor ideal de diseño.

### 2.7.2. Incorporación de Tecnología de Automatización (Propuesta de Mejora)

Para avanzar con la propuesta del emprendimiento de Automatización de la Huerta Hidropónica en búsqueda de lograr una mejora en los resultados de los procesos, se establece un conjunto básico de sensores y actuadores con sus procesadores asociados, que se detalla en la Tabla 6 –“Kit Básico para Automatizar el Emprendimiento de Hidroponía”, en la que se detallan los distintos dispositivos de medición y control, con precio total estimado de mercado de $1.500.000 (U$S 1.000), a lo cual se le debe agregar un costo estimado de instalación y cableado de unos $ 500.000 (U$S 300).

Tabla 6 – Kit Básico para Automatizar el Emprendimiento de Hidroponía

| Sensor | Variable/Funcion | Ubicación |
|---|---|---|
| **DHT22** | Temperatura/Humedad Relativa Ambiente | Junto a placa Arduino |
| **DS18B20** | Temperatura del agua | Tanques 1-2 SN |
| **BMP180** | Presión atmosférica | Interior |
| **MQ2** | Concentración CO2 Ambiente | Interior |
| **Arduino Uno / Mega / Nano** | Microcontrolador | Columna eléctrica. |
| **ESP32 / ESP8266** | Módulo Wifi | En área |
| **LDR** | Intensidad Lumínica | Interior |
| **Raspberry Pi 4b - 2gb Ram** | Microprocesador | Junto a la Columna |
| **Módulo RTC** | Reloj | En área |
| **Conductímetro** | Medidor de EC-TDS | Portátil |

La integración de este Kit Básico a la huerta hidropónica, puede reducir la merma en cuanto a la productividad ideal pasando del 20 % (citado para el invernadero convencional actual) al 5%, lográndose alcanzar el 95 % del valor de producción ideal de diseño que es de 850 Kg./mes. Aumentando en consecuencia el rendimiento promedio en unos 130 Kg/mes, que a un precio de comercialización de 1.000 $/kg, resulta en un ingreso marginal de 130.000 $/mes. Asimismo se destaca que el consumo mensual de energía y nutrientes alcanza un promedio de $ 200.000, estimándose que con la automatización se presentará un aumento del 10% por mayor uso de energía y más necesidad de nutrientes, lo que resulta en un incremental de cosos de $ 20.000 por mes.

Si bien la necesidad de MOD (Mano de obra Directa) disminuye considerablemente con la automatización, al tratarse de un emprendimiento de Pequeña Empresa tipo familiar, se entiende que el Recurso Humano involucrado podrá liberarse de ese trabajo para mejorar el desempeño de otras tareas con mayor valor agregado, tales como limpieza, preparación de germinación, trasplante ó cosecha, Por lo cual, a pesar del impacto considerable que produciría la reducción de Costos de Mano de Obra, no será tenido en cuenta en el presente estudio, sin embargo para emprendimientos de mayor capacidad, debe ser considerado un factor clave a considerar para obtener reducción de costos y lograr importantes ventajas competitivas.

### 2.7.3. Evaluación de la Propuesta de Mejora

Para evaluar el impacto económico de la automatización del invernadero, es necesario establecer la relación Costo-Beneficio de las mejoras propuestas, para ello se deben estimar los Desembolsos

Iniciales, el impacto en los Costos Operativos y el impacto en los Ingresos por Ventas, en la Tabla 7 “Impacto Económico Producido por Automatización Básica” se aprecian los cálculos correspondientes.

El presupuesto de inversión estimado para la incorporación del Kit Básico de tecnología de control automatizado para el caso analizado (incluyendo el cableado y la instalación), se estima en el orden de $2.000.000.- (aprox. U$S1.300.-).

Tabla 7 – Impacto Económico Producido por Automatización Básica

| Categoria | Descripción | Detalle | Cálculo | Montos |
|---|---|---|---|---|
| **Inversión en Automati-zación** | Desembolso Inicial (DI) | Equipos, que incluyen sensores, actuadores y sistemas de control | Costo Kit Básico e Instalación | $ -2.000.000 |
| **Incremento de Costos Operativos** | Costo Soporte Sistema | Mantenimiento, asociado a la calibración, limpieza y reemplazo de componentes consumibles | 10 % del DI por año = $/año -200.000 | $/año - 440.000 |
| | Incremento Costos de Insumos | Consumos energéticos, (iluminación, ventilación, bombas, etc.). Consumo de soluciones nutritivas. | Incremento $/mes 20.000 x 12 = $/año -240.000 | |
| **Incremento por mayores Ventas** | Mejora de la Producción | Producción aumenta en 130 kg/mes a razón de $ 1.000 $/kg. | $/mes +130.000 x 12 = | $/año +1.560.000 |

El Resultado Neto Anual (RNA) surge de la diferencia entre el Incremento de Ventas $1.560.000 y el Incremento de Costos $440.000, dando $1.120.000, por lo cual el Pay Back ó Pb (Período de Recuperación=DI/RNA) resulta ser de 1,8 años. Lo que significa que en 22 meses se recupera la inversión de automatización, por lo que se trata de un desembolso interesante, de rápida devolución y de un monto que resulta relativamente bajo en relación al impacto en términos de productividad y eficiencia esperados.

Además, para evaluar la fortaleza de la viabilidad económica, se realizó un análisis de sensibilidad considerando incremento +20 % en DI y reducción -20 % en RNA, situación en que ambos extremos desfavorables se dieran simultáneamente, dando como resultado una extensión del Pb de 10 meses. Es decir que el Período de Recuperación de la Inversión se extendería a 32 meses (menos de 3 años). Estos valores sugieren que aún en adversidad, el proyecto sigue siendo económicamente sostenible para pequeños productores, especialmente si se integra en programas de agricultura urbana o familiar.

El principal valor agregado de la automatización propuesta no radica únicamente en los beneficios económicos inmediatos, sino en la creación de un modelo dinámico y preciso del invernadero con estabilización y proyección futura. La recopilación sistemática y continua de datos de las variables críticas del proceso permite, por un lado, definir valores de referencia con mayor exactitud debido a la frecuencia de obtención (24 hs. x 7 días/sem.), y por otro, comprender con detalle cómo las fluctuaciones en estas condiciones inciden en el rendimiento productivo y en la eficiencia del uso de recursos.

Esta capacidad de análisis posibilita la construcción de un marco de información robusto que mejora la toma de decisiones, habilita ajustes finos en tiempo real y genera aprendizajes transferibles a futuros escenarios de cultivo. En consecuencia, se logra no solo una producción más estable y predecible, sino también una mayor eficiencia en el uso de agua y fertilizantes, reducción de mermas e incremento de la productividad, tanto en volumen y peso, como en la calidad de las hortalizas producidas.

Esta proyección, si bien conservadora, se apoya en la evidencia de que la mejora técnica ofrece un doble beneficio: por un lado, eficiencia operativa, al disminuir costos y tiempos improductivos; y por otro, incremento productivo, al aumentar el volumen y la calidad de la producción, fortaleciendo la sustentabilidad y competitividad del esquema productivo a largo plazo.

## 3. CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema de Invernadero Inteligente tiene la intensión de demostrar la factibilidad técnica y económica de aplicar tecnologías emergentes y de IoT a la producción hidropónica de pequeña escala. La automatización de Variables Críticas como Temperatura, Humedad y Conductividad Eléctrica reduce la variabilidad de cultivo y mejora la eficiencia general del proceso.

Desde el punto de vista económico, el análisis evidencia un período de recuperación de inversión que va desde poco menos de dos a poco menos de tres años, según escenarios favorables o adversos, lo que implican periodos de tiempo que resultan asimilables para el pequeño productor. El impacto ambiental positivo se refleja en un eficiente uso del consumo de agua y de nutrientes, mientras que el componente social radica en la disponibilidad de tecnológica accesible a emprendimientos de baja escala y en la concentración de la mano de obra hacia actividades de mayor valor agregado.

En base a la literatura especializada más recientemente publicada, al estado de accesibilidad/ disponibilidad de ciertas tecnologías emergentes, y al estudio de campo del invernadero hidropónico de Tandil, el resultado de la investigación efectuada permite proyectar, entre otras, las siguientes mejoras cuali y cuantitativas que justifican la incorporación del Modelo de Automatización propuesto:

- Crecimiento más rápido y con calidad uniforme.
- Producción estable y continua.
- Maximiza la densidad de cultivo.
- Aumenta la productividad.
- Uso más eficiente del agua y nutrientes.
- Mejora de competitividad, reduce los costos.
- Permite el manejo a distancia, reduce los errores humanos.
- RRHH dedicados a tareas de mayor valor agregado.
- Mejora la rentabilidad, Pb da un máximo de tres años para el escenario más adverso.
- Disminuye el impacto ambiental. Permite documentar trazabilidad
- Sistema modular replicable y escalable a niveles de industrializar los procesos.

Este análisis pretende servir como punto de partida para futuros estudios e implementaciones que busquen profundizar la cultura de mejora continua mediante la incorporación de tecnologías que brinden mayor Sustentabilidad Productiva, pasando del cultivo artesanal de un Invernadero Tradicional a las ventajas que derivan de Modelo de Invernadero Inteligente propuesto.

Se concluye que la automatización progresiva de sistemas hidropónicos —particularmente mediante sensores industriales de pH y EC, controladores de bajo costo y software abierto— puede representar una vía concreta hacia la agricultura de precisión sustentable. Además, el proyecto se configura como una empresa de triple impacto, al integrar resultados económicamente viables, ambientalmente responsables y socialmente inclusivos, contribuyendo a la democratización del acceso a la tecnología en la producción de alimentos.

## 4. REFERENCIAS


Castañares, J. L. (2020). *ABC de la Hidroponía.* Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agrpecuaria -INTA.

Chaudhary, D. K. (2025). Hydroponics cultivation of Crops: A sustainable Approach to Modern Agriculture.

Dahiya, U. S. (2025). Revolutionizing Agriculture: Exploring the potential of Hydroponics for global food Security.

Ibrahim, L. A.-K. (2023). Aquaponics: A sustainable Path to food Sovereignty and Enhanced Water use efficiency.

Luwei Wang, M. X. (19 de dec de 2024). Sensing Technologies for Outdoor/Indoor Farming.

Malabadi, R. B. (2024). Advances in Hydroponic Farming Techniques.

Malabadi, R. B. (2024). Greenhouse Farming: Hydroponic Vertical Farming - Internet Of things (IoT) Technologies.

Paul, B. A. (2022). *Sustainable Smart Aqueaponics Farming usig IOT and data analysis.*

Rahman, M. A. (2024). An IoT-based Hidroponic system for crop recommendation and nutrient control.

Sabrina Sharmin, e. a. (2025). Nutrient Film Technique Efficiency in Urban Farming.

Shamim Ahamed, e. a. (2023). Slope Optimization in NFT Systems.

Shamim Ahamed, S. K. (2025). An IoT-based Hydroponic system for crop recomendation and nutrient control.

Yegül, C. (2025). Development of an IoT-based kit to monitor environmental parameters for use in indoor agriculture.

Yu Bai, Z. L. (2025). A review on real-time plant monitoring sensors for smart agriculture. *Chemical Engineering Journal*.

# "Diseño y Desarrollo de un Sistema Productivo para la Reutilización de Plásticos mediante Inyección en Moldes de Aluminio Fundido"

Barrera, Sebastián
Grossmüller, Martin
Ludueña Cid, Matías
Gareis, Valeria
*Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Argentina*
*sbarrera@uca.edu.ar*

## Resumen

Este trabajo de investigación se propone atacar una problemática que en las últimas décadas fue en constante crecimiento y generó grandes inconvenientes en múltiples sectores, los desechos plásticos. Según el Censo Provincial de Basura Costera Marina de la Red Costera Bonaerense (RECOBO) realizado en la provincia de Buenos Aires, sólo en 2024, de un total de 49.913 residuos encontrados en la costa argentina, el 74,05% se constituía por plásticos.[1]

Debido a la magnitud de estas estadísticas, desde el laboratorio de Tecnología de Materiales presentamos una posible solución mediante el diseño y desarrollo de un sistema productivo de bajo costo, que permita reutilizar el plástico recuperado generando nuevas piezas a través del método de inyección en moldes construidos mediante la fundición de chatarra de aluminio. Este proceso se desarrolla dentro de los ejes del triple impacto:

*Ambiental*: Reciclaje de aluminio y plásticos para la creación de los moldes y la inyección en los mismos.

*Social*: Proponiendo una iniciativa interdisciplinaria que busca la generación de espacios de prácticas de laboratorio que permita transferir esta tecnología hacia otros actores socioeconómicos, como cooperativas, etc.

*Técnico Económico*: El desarrollo de una inyectora permitirá obtener un nuevo producto final a partir de los desechos dándole una mayor utilidad y valor agregado. Al mismo tiempo, nos proponemos transferir esta tecnología hacia otros actores socioeconómicos, como cooperativas, etc.

Palabras clave: Reciclaje, Residuos, Triple impacto

## Abstract

This research work aims to address an issue that, in recent decades, has been in constant growth and has generated major inconveniences in multiple sectors: plastic waste. According to the Provincial Marine Coastal Litter Census of the Buenos Aires Coastal Network (RECOBO)

[1] CRM, & PRENSA. (2025, enero 27). Según un censo de 2024, más del 70% de los residuos en la costa bonaerense son plásticos. Mundo Marino. https://prensa.mundomarino.com.ar/segun-un-censo-de-2024-mas-del-70-de-los-residuos-en-la-costa-bonaerense-son-plasticos

conducted in the Province of Buenos Aires, in 2024 alone, out of a total of 49,913 waste items found on the Argentine coast, 74.05% consisted of plastics.[2]

Given the magnitude of these statistics, from the Materials Technology Laboratory we present a possible solution through the design and development of a low-cost production system that allows for the reuse of recovered plastic by generating new parts through injection into molds built by casting aluminum scrap. This process is developed within the axes of the triple impact:

*Environmental:* Recycling aluminum and plastics for the creation of the molds and injection into them.

*Social*: Proposing an interdisciplinary initiative that seeks the creation of laboratory practice spaces to enable the transfer of this technology to other socioeconomic actors, such as cooperatives, etc.

*Technical-Economic:* The development of an injection molding machine will make it possible to obtain a new final product from waste, giving it greater utility and added value. At the same time, we aim to transfer this technology to other socioeconomic actors, such as cooperatives, etc.

Keywords: Recycling, Waste, Triple impact.

## 1. Introducción

En el marco de una propuesta académica impulsada por la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias de la Universidad Católica Argentina, el proyecto se desarrolló en el Laboratorio de Termodinámica y Máquinas Térmicas, y en el Laboratorio de Materiales y Mecánica de Suelos. En esta iniciativa participaron cinco pasantes, estudiantes de las carreras de Ingeniería Industrial y Civil, bajo la supervisión de dos docentes.

El reciclado de plásticos y aluminio constituye un tema de gran relevancia a nivel mundial, debido a los problemas que generan estos residuos tanto en los rellenos sanitarios como en los cuerpos de agua, y a la necesidad de promover alternativas de valorización que reduzcan su impacto ambiental. En la Ciudad de Buenos Aires, la labor de los recicladores urbanos y las políticas de separación en origen han impulsado una mayor conciencia ciudadana en relación con el manejo de los residuos.

La motivación de este proyecto surge de la posibilidad de generar productos a partir de plásticos y chatarra de aluminio recolectados por la cooperativa RUO (Recuperadores Urbanos del Oeste), aportando valor agregado a los materiales recuperados por los recicladores urbanos. Sobre la base de la experiencia del grupo de pasantes del año anterior, que construyó una primera inyectora, en esta etapa se avanzó en el desarrollo de una nueva inyectora de plásticos. Asimismo, se diseñaron y comenzaron a fabricar modelos para la fundición de moldes en aluminio destinados a matricería, y se realizaron ensayos de tracción sobre probetas plásticas con y sin aditivos, con el fin de evaluar sus propiedades mecánicas y ampliar el rango de aplicaciones posibles.

De este modo, el trabajo combina la formación práctica en diseño, fundición y ensayo de materiales con una perspectiva ambiental y social. La etapa actual apunta a concretar la producción de un primer producto —macetas obtenidas mediante moldeo por inyección— como demostrador de la viabilidad técnica del proceso y de su potencial transferencia a la cooperativa, fortaleciendo así su implementación productiva.

[2] Censo Provincial de Basura Costera Marina de la Red Costera Bonaerense (RECOBO) https://www.vidasilvestre.org.ar/?28660/El-74-de-los-residuos-en-las-playas-bonaerenses-son-plasticos

## 2. Desarrollo

A partir de conocer el trabajo de la cooperativa RUO en el barrio de Caballito se identificó la necesidad de que los recicladores pudiesen generar algún producto en la cooperativa con los residuos plásticos que obtenían, cuyo actual destino es la venta enfardado a distintas empresas. De esa manera se obtendría un doble beneficio, de la venta propia del plástico a la empresa y de la venta de un producto final realizado en la cooperativa y por los propios recicladores a partir de la materia prima recolectada.

Para desarrollar el producto se analizaron diferentes alternativas de piezas a producir, priorizando que fueran de fácil producción, bajo costo y atractivas para el perfil de clientes que tiene la cooperativa. Por esta razón, se eligieron las macetas, un producto muy versátil, tanto para interiores como para exteriores.

### 2.1 Piezas a producir:

#### 2.1.1 Macetas

Se eligió la elaboración de macetas, a pedido de la propia cooperativa ya que cuentan con un compost y una huerta orgánica, produciendo y vendiendo plantines a los vecinos. Fabricar macetas con plástico reciclado les permitiría ofrecer sus productos en recipientes también producidos por ellos mismos, fortaleciendo su proyecto sustentable.

Para el desarrollo de la matriz se evaluaron distintos tipos de maceta con diversos diámetros, en donde se buscó un diseño que cumpliese tanto con la parte estética como la practicidad para poder ser inyectado.

Se realizaron modelos en Fusion360 y luego se imprimieron en una impresora 3D para evaluar la funcionalidad y de esa manera poder diseñar la matriz. Finalmente se escogió una maceta de 9 cm de diámetro, la cual fue impresa y es donde se basó la matriz de aluminio. El material que se utilizó para realizar esta matriz es aluminio de fundición que fue recolectado por los mismos recicladores de la cooperativa.

A continuación, se presenta la metodología a través de la cual se produce el molde para las macetas

#### 2.1.2 Moldes

Para la producción de las macetas se producirá un molde reutilizable, permitiendo producir un gran volumen de ellas, siendo la materia prima a usar aluminio reciclado por su bajo costo y fácil acceso, buscando darle provecho a objetos que iban a ser desechados.

Pasos a seguir para la fabricación del molde:

**1) Diseño y prototipado**

- En una primera etapa se realizó el modelado CAD de la maceta y su posterior impresión 3D, con el objetivo de validar aspectos geométricos tales como la ergonomía, el espesor de las paredes y la factibilidad de desmoldeo. A partir de este prototipo se establecieron las dimensiones de la matriz y se definió el procedimiento de moldeo.

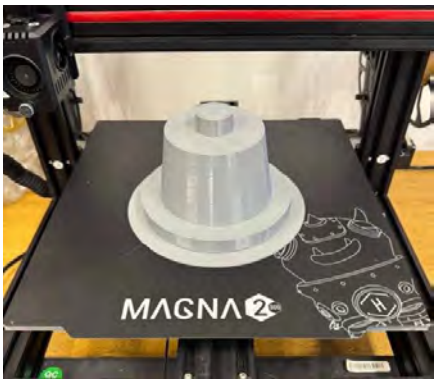



***Imagen 1*** *– Modelo de la pieza A del molde de macetas obtenida mediante impresión 3D*

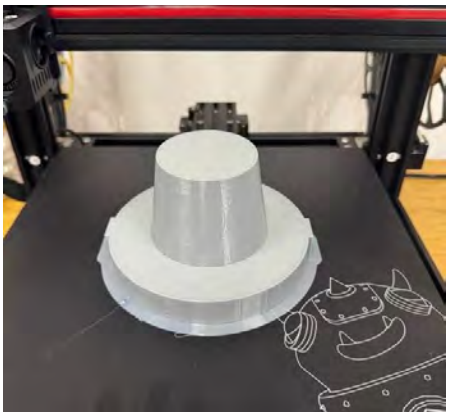


***Imagen 2*** *– Modelo de la pieza B del molde de macetas obtenida mediante impresión 3D*

**2) Armado del Molde**

Para esta etapa nos dirigimos a la Escuela Técnica N.º 33 - Fundición Maestranza del Plumerillo, donde llevamos a cabo el proceso de fundición. Si bien realizamos nosotros mismos las tareas de preparación y moldeo, contamos con la asistencia y supervisión de los especialistas en fundición de la institución, quienes garantizaron la correcta ejecución de cada paso y el cumplimiento de las normas de seguridad.

A - Preparación de la arena de moldeo

La mezcla de arena verde se formuló con una proporción aproximada de 75 % de arena silícea fina, 22 % de bentonita y el porcentaje restante de agua. La homogeneidad de la mezcla fue asegurada mediante un mezclado continuo mediante el uso de una máquina mezcladora hasta alcanzar la humedad adecuada, condición indispensable para conferir cohesión y evitar desmoronamientos durante la manipulación del molde.



*Imagen 3 - Máquina mezcladora para arena*

B - Preparación de la caja de moldeo

Se empleó una caja de moldeo de hierro fundido, equipada con broches de cierre y guías de alineación para garantizar la correcta unión de ambas mitades. Se buscó una del tamaño adecuado, que cubra completamente el modelado.



*Imagen 4: Parte inferior de la caja*



*Imagen 5: Parte superior de la caja*

C - Colocación y tratamiento de los modelos

Los modelos de la pieza se posicionaron en la caja considerando cuidadosamente el plano de partición y la ubicación del canal de colada. Sobre las superficies de los modelos se aplicó una capa de talco antiadherente para facilitar la extracción posterior y preservar la integridad de la cavidad del molde. Asimismo, se dispuso un tubo en la mitad correspondiente del molde con el fin de conformar el bebedero, elemento del sistema de colada destinado a guiar el aluminio fundido hacia los canales de alimentación.



*Imagen 6: molde con el talco antiadherente listo para colocar la arena*

D - Relleno con arena y compactación

El llenado de la caja se efectuó de manera progresiva, de a capas sucesivas, que luego fueron compactadas. Las primeras dos paladas fueron previamente tamizadas, con el fin de obtener la arena más fina posible y con la menor cantidad de impurezas posible. El resto de la arena se añadió y se sometió a un apisonado para ser compactada, buscando la mayor uniformidad posible en el molde, para evitar defectos como zonas flojas o desprendimientos internos.



*Imagen 7: Tamizado de la arena*



*Imagen 8: Apisonado de la arena*



*Imagen 9: Arena con el tubo para el bebedero*



*Imagen 10: Apisonado final*

E - Nivelación de la superficie

Una vez completado el llenado, se niveló la superficie superior de la arena cuidadosamente con una regla metálica, buscando que la superficie sea lo más plana posible y evitando superficies disparejas que puedan dificultar el cierre.



*Imagen 11: Nivelación de la superficie*

F - Extracción de los modelos

Los modelos se retiraron con mucho cuidado, aplicando ligeros golpes para facilitar el proceso. Posteriormente, las cavidades fueron sometidas a una limpieza con aire comprimido, eliminando partículas sueltas y mejorando la definición de las superficies internas.



*Imagen 12: Extracción del modelo de dentro del molde*

G - Conformación del sistema de colada y colocación de mazarotas

Se diseñó el sistema de alimentación incorporando bebedero, canales y ataque con geometrías que favorecen un flujo estable y sin turbulencias. Se colocaron bacines de colada, cuya función es suministrar metal líquido adicional durante la solidificación, evitando así defectos por rechupes y contracciones volumétricas.



*Imagen 13: Armado del canal de colada*



Imagen 14: molde finalizado con el bacín de colada

H - Fusión y colada del aluminio

Los lingotes de aluminio se fundieron en un horno de crisol, alcanzando una temperatura de aproximadamente 800 °C, superior al punto de fusión del metal (660 °C), con el propósito de mejorar la fluidez. La colada se efectuó mediante cucharón, controlando la velocidad de vertido y minimizando turbulencias. Durante toda la operación, se hizo uso obligatorio de equipos de protección personal: guantes térmicos, gafas y calzado de seguridad.[3]



*Imagen 15: Lingote de Aluminio*



*Imagen 16: Horno de crisol*

[3] Groover, M. P. (2007). Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas (3ª ed.). México: McGraw-Hill.



Imagen 17: Moldes con el aluminio fundido dentro

I - Desmoldeo y limpieza de la pieza

Tras la solidificación completa, se procedió a la apertura de las cajas y a la ruptura del molde de arena. La pieza obtenida fue extraída cuidadosamente y sometida a operaciones de limpieza para remover adherencias y restos de arena.



*Imagen 18: molde y pieza luego de la fundición*



*Imagen 19: Pieza A Fundida*



*Imagen 20: Pieza B Fundida*

J - Mecanizado y terminación de la matriz

Finalmente, la pieza obtenida de la fundición debe ser sometida a operaciones de mecanizado y terminación superficial, con el fin de generar la cavidad correspondiente a la maceta, los alojamientos funcionales y las referencias de montaje.

Entre los detalles técnicos incorporados a la matriz se destacan:

- Canales de salida de aire en la cavidad para evitar el atrapamiento de gases durante el proceso de inyección.
- Alojamiento para resistencias térmicas en caso de requerirse control de temperatura del molde.
- Acabado superficial mediante lijado manual, con el objetivo de optimizar la terminación estética de la pieza plástica resultante.

## 2.2 Inyectora

En el marco de este proyecto, los alumnos de la Universidad Católica Argentina desarrollaron en el año 2024 una inyectora manual a partir de un taladro de banco en desuso (Barrera, Miracca, Solari, Fortín, & Sánchez Granel, 2024). La misma funciona por gravedad: el plástico, cargado en la parte superior, es empujado por un pistón que también ingresa desde arriba. Sin embargo, este método presenta una falla evidente: al calentarse, el plástico genera vapores que quedan atrapados en la camisa del pistón, lo que provoca que las probetas no siempre se formen correctamente.



*Imagen 21- Inyectora de banco terminada, con molde y controladores de temperatura*

En línea con este avance y con las necesidades de la cooperativa, este año se desarrolló otra inyectora manual a partir de una incluidora metalográfica en desuso, la cual corresponde a un cilindro y pistón hidráulico, calefaccionado por tres resistencias (tipo zunchos) controladas por una unidad de control y termocupla. Esta segunda inyectora tiene también como finalidad, ser entregada a la cooperativa con su respectivo molde de macetas.

Se reutilizo la mayoría de la incluidora metalográfica, ya sea el pistón con la camisa y sus resistencias, el sistema de control y la termocupla (lo que permite medir y controlar la temperatura), así como también el criquet hidráulico. El gran desafío se presentó en el tipo de agarre que poseía la camisa de la incluidora, ya que para el trabajo que realizaba en la inclusión solo necesitaba compactar la resina, pero para poder inyectar el plástico y que fluya se necesitaba un agarre más robusto.

Actualmente, la inyectora se encuentra en su fase final de desarrollo, restando todavía el armado de una conexión con el molde, que garantice el correcto flujo de plástico durante el proceso.




*Imagen 22 - Inyectora derivada de inclusora metalográfica, vista frontal*

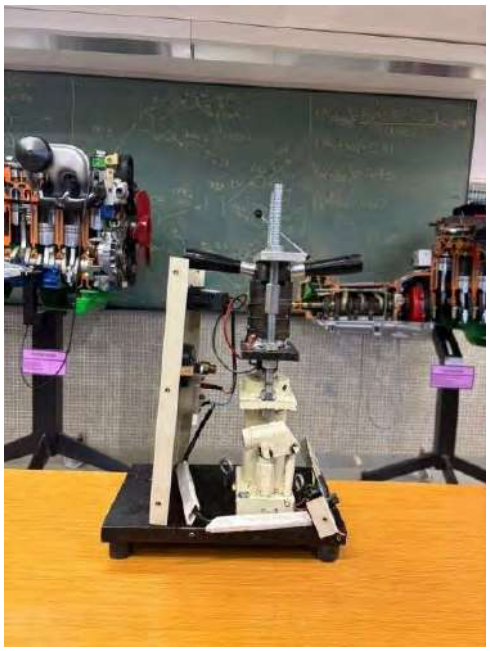


*Imagen 23 - Inyectora derivada de inclusora metalográfica, vista lateral*

De manera complementaria, se desarrolló un molde para la inyección de probetas de prueba, destinadas a ensayos de tracción. Esto permite evaluar la resistencia mecánica de los materiales procesados, y hallar la alternativa más conveniente.

## 2.3 Ensayos y análisis sobre los materiales:

En el transcurso del año pasado, un grupo de estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Argentina realizó ensayos de tracción en probetas, principalmente de residuos de tapitas de bebidas o de envases de shampoo o acondicionador de polietileno. Del análisis de los resultados del ensayo, se concluyó que, cuando los plásticos estaban limpios, se

generaba una mayor homogeneidad en las probetas, lo que resultaba en un material más resistente[4].

Por esta razón, en el marco del proyecto correspondiente al año 2025 se decidió tener en cuenta que la resistencia mejora cuando el material reciclado está limpio, e incluir otro criterio más, que es combinar el plástico con un aditivo para aumentar su rigidez y resistencia, ya que consideramos que estas son dos son características fundamentales para el producto final por las posibles condiciones a las que puede ser sometido.

Los casos de estudio fueron:

1) Tapitas limpias
2) Tapitas limpias con talco
3) Tapitas limpias con exceso de talco
4) Tapitas sucias con talco

La metodología en todos los casos fue clasificar el material reciclado según el color y el tipo, para luego obtener escamas mediante una trituradora. A continuación, fabricamos un molde con la forma de la probeta, que luego se colocó en la inyectora.

Para el caso de tapitas limpias, se limpiaron las escamas y, posteriormente, se colocaron directamente en la inyectora para formar la probeta A. En el segundo caso, se limpiaron las escamas, se agregó el talco en un 20% m/m y luego se colocaron en la inyectora para formar la probeta B. Luego se realizó la probeta C, donde se volvió a utilizar el método del segundo caso pero con 40% m/m de talco. Y, por último, se utilizaron escamas de plástico sin limpiar, a las cuales le agregamos un 20% m/m de talco, para así realizar la probeta D.

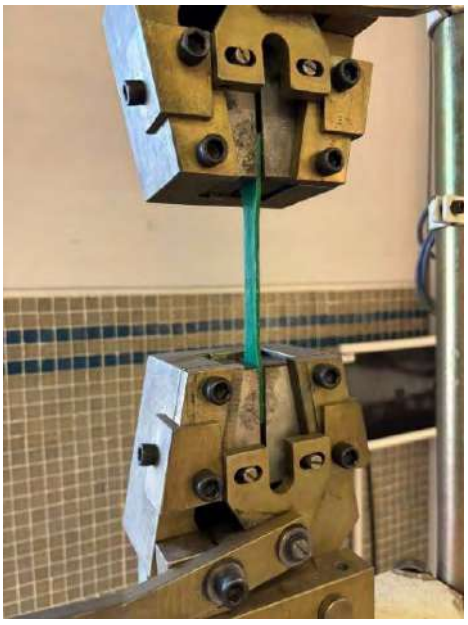
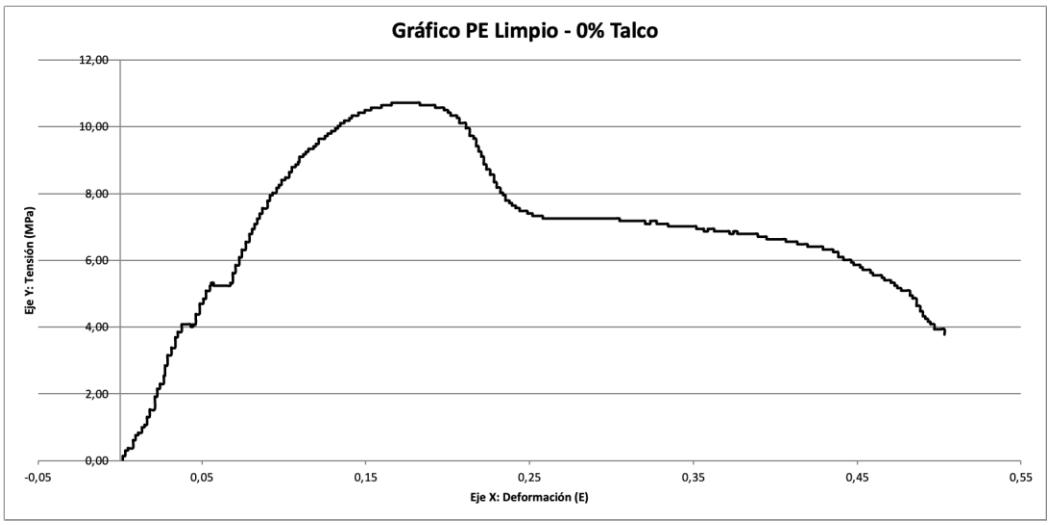
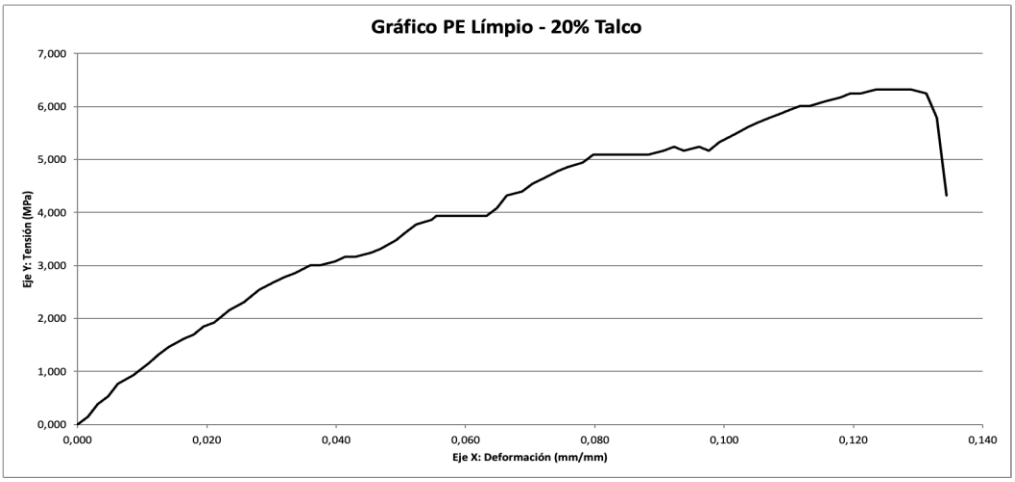


*Imagen 24 - Ensayo de tracción*

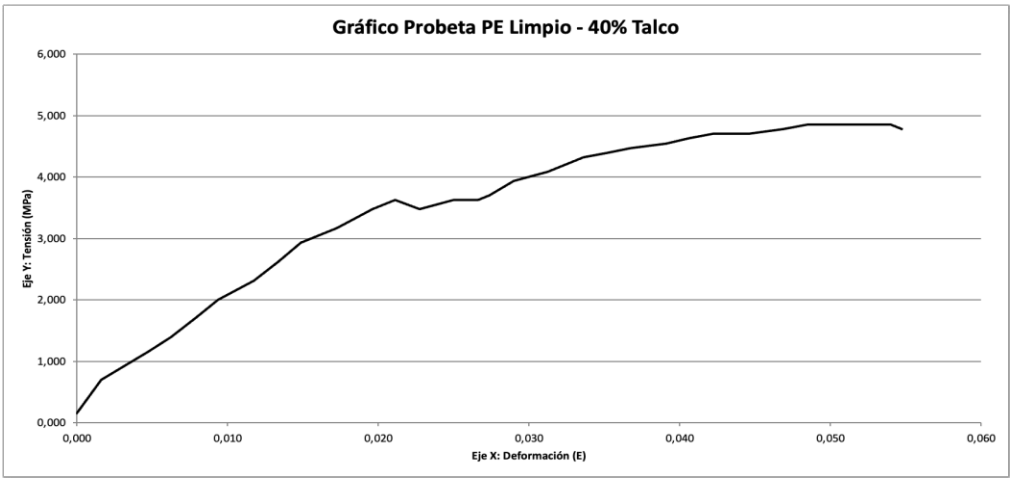
[4] Barrera, S., Miracca, L., Solari, S., Fortín, G., & Sánchez Granel, R. (2024). *Reciclaje de plásticos y aluminio: Innovaciones en la tecnología de materiales y transferencia de tecnología para la industria 5.0.* UCA.



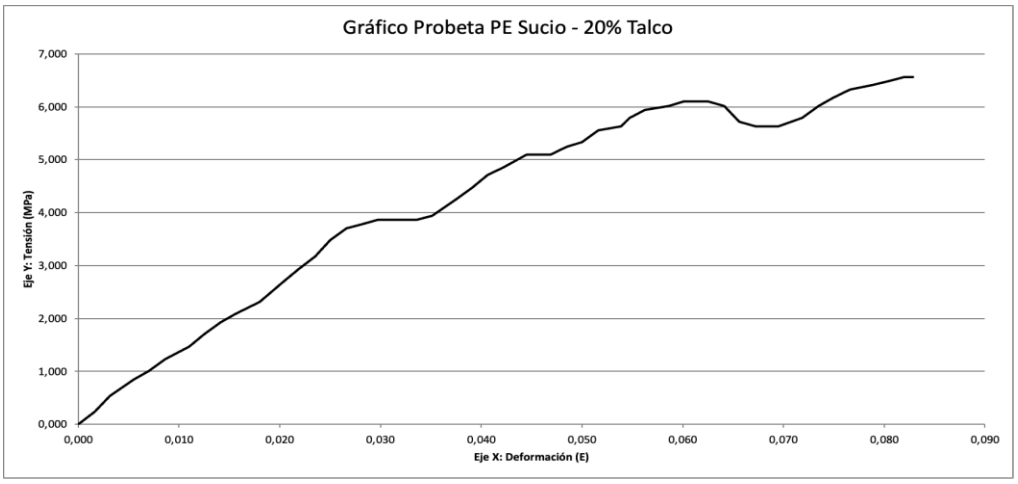

**Ensayo tracción caso 1:** Probeta PE Limpio - 0% Talco
**Tensión Máxima** (MPa) = 10,725




Ensayo tracción caso 2: Probeta PE Limpio - 20% Talco
**Tensión Máxima** (MPa) = 6,323




Ensayo tracción caso 3: Probeta PE Limpio - 40% Talco
**Tensión Máxima** (MPa) = 4,857




**Ensayo tracción caso 4:** Probeta PE Sucio - 20% Talco
**Tensión Máxima** (MPa) = 6,559

De los resultados obtenidos a partir de los ensayos de tracción podemos observar que cuando no usamos talco se obtuvo la mayor resistencia a la tracción. también podemos ver como aumento la rigidez del material al colocarle talco, volviéndolas así más rígidas y resistentes frente a la flexión y a la tracción, pero no se ve reflejada una diferencia sustancial entre las probetas del 20% de talco, ya que independientemente de si usábamos plástico limpio o sucio se comportó muy parecido. Así como también, al usar 40% de talco, la rigidez continúo aumentando hasta límites excesivos.

Cabe destacar que, durante la preparación de las probetas con talco, no se tuvo en cuenta de la mejor manera el proceso de mezclado, lo que ocasionó la formación de burbujas de aire en el interior de algunas muestras. Este defecto afectó negativamente las propiedades mecánicas y la calidad final de las probetas, disminuyendo así su desempeño esperado.

Este ensayo nos muestra la importancia del lavado de los plásticos antes de ser reciclados cuando no usamos aditivos. Pero al colocarle talco (aditivo que da rigidez) el lavado queda en un segundo plano, lo que puede ayudar a ganar tiempo si se requiere un plástico rígido, además de que se debe tener en cuenta que al agregarle el aditivo si no se lo coloca correctamente este puede facilitar la generación de burbujas de aire dentro de la mezcla. En el caso de las macetas observamos que nos convendría usar plástico limpio, pero sin aditivos, para que se comporte de forma versátil tanto en interiores como exteriores, sobre todo ante los golpes.

## 3. Discusión

El desarrollo sostenible implica satisfacer las necesidades actuales sin poner en riesgo la capacidad de las generaciones futuras para atender las suyas. En esta línea, la Ciudad de Buenos Aires incorporó en 2016 los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre los cuales se destaca el ODS 12: “Producción y consumo responsables”. Este objetivo busca optimizar el uso de los recursos, fomentar infraestructuras sostenibles y minimizar la generación de residuos a través de la prevención, reducción, reciclaje y reutilización.

El proyecto en curso se vincula directamente con la Meta 12.5 del ODS 12, ya que propone reducir el impacto ambiental de los plásticos de un solo uso mediante la promoción de la economía circular. En particular, se centra en la transferencia de tecnología desde los estudiantes de la UCA hacia la Cooperativa RUO, con el propósito de mejorar sus prácticas de reciclaje de plásticos y aluminio, generando al mismo tiempo beneficios ambientales y sociales.

Este enfoque práctico no solo resulta significativo en términos de gestión de residuos, sino que además fortalece la conciencia ambiental dentro de la comunidad universitaria, impulsa el trabajo interdisciplinario y consolida la colaboración con actores estratégicos como las cooperativas de recicladores urbanos.

## 4. Conclusiones

Con una iniciativa clara, dada la gran problemática de los desechos plásticos, nos propusimos investigar y desarrollar un proyecto para el reciclaje de plásticos y aluminio. Este proyecto, tiene bases en los pasantes del año pasado, pero pretende seguir siendo un incentivo para los próximos pasantes a seguir mejorándolo, seguir ayudando a la cooperativa y la comunidad. Esta iniciativa tiene como propósito impulsar la conciencia ambiental en el ámbito académico, incentivar la colaboración interdisciplinaria y estrechar la relación con actores sociales, en particular con las cooperativas de recicladores urbanos. Asimismo, se proyecta que funcione como un modelo replicable para otras instituciones educativas, mostrando que la innovación y la sostenibilidad pueden integrarse en la construcción de soluciones prácticas frente a los desafíos de la contaminación y la gestión de residuos.

En nuestro proyecto hay una línea de trabajo muy clara, reducir la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización de los mismos, ya que el desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones, garantizando el crecimiento económico, bienestar social y el cuidado del medio ambiente. Es por ello que desde el laboratorio se busca reducir el impacto ambiental desde una economía circular, desde la creación de una nueva inyectora y los moldes de las macetas hasta la futura producción y venta de las mismas.

## 5. Referencias


- Censo Provincial de Basura Costera Marina de la Red Costera Bonaerense (RECOBO) https://www.vidasilvestre.org.ar/?28660/El-74-de-los-residuos-en-las-playas-bonaerenses-son-plasticos
- CRM, & PRENSA. (2025, enero 27). Según un censo de 2024, más del 70% de los residuos en la costa bonaerense son plásticos. Mundo Marino. https://prensa.mundomarino.com.ar/segun-un-censo-de-2024-mas-del-70-de-los-residuos-en-la-costa-bonaerense-son-plasticos
- Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. (2021, mayo 12). Recuperadores urbanos: su rol en el sistema de reciclaje es fundamental. Espacio Público e Higiene Urbana. https://buenosaires.gob.ar/espaciopublicoehigieneurbana/noticias/dia-del-recuperador-urbano-su-rol-en-el-sistema-de-reciclaje
- Recuperadores Urbanos del Oeste. (2024). Servicios de la cooperativa. Recuperadores Urbanos del Oeste. http://www.cooperativaruo.org.ar/servicios
- Recuperadores Urbanos del Oeste. (2024, 13 de junio). Recuperadores Urbanos del Oeste (RUO) Institucional [Video]. YouTube. https://youtu.be/i7WQzKtlZrE?si=delIphLeC8pUZ_Pk
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials Science and Engineering: An Introduction (10.ª ed.). Wiley
- Groover, M. P. (2007). Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas (3ª ed.). México: McGraw-Hill.
- ASTM D638-18. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International.


## 6. Bibliografia:


Barrera, S., Miracca, L., Solari, S., Fortín, G., & Sánchez Granel, R. (2024). *Reciclaje de plásticos y aluminio: Innovaciones en la tecnología de materiales y transferencia de tecnología para la industria 5.0.* Pontificia Universidad Católica Argentina.

Facal, G., & Barrera, S. (2019) - Apunte de Cátedra: Tecnología Mecánica. Pontificia Universidad Católica Argentina.

Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2009). Materials science and engineering: An introduction (8th Edition). John Wiley and Sons.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). Manufactura, ingeniería y tecnología. Volumen 1: Ingeniería y tecnología de materiales (7.ª ed.). Pearson.

# FLUJOS RESIDUALES DE VIDRIOS DE SEGURIDAD CON POLIVINIL BUTIRAL. POTENCIAL DE CIRCULARIDAD DESDE EL ENFOQUE EXERGÉTICO DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y REFORMA DEL MARCO LEGAL

Herrería, Elisabeth Ruth; Carucci, Juan; Servidio, Lucía Irene; Jurado, Vanina Gabriela; Vidal, Mauro Hernán Ricardo

*Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas, Universidad Nacional de La Matanza.*
*eherreria@unlam.edu.ar; jcarucci@unlam.edu.ar; lservidio@unlam.edu.ar; vjurado@alumno.unlam.edu.ar; mvidal@unlam.edu.ar*

**RESUMEN**

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo aplicar el enfoque exergético al análisis de ciclo de vida (ACVx) de los flujos residuales de vidrios de seguridad con polivinil butiral (PVB) originados tanto en la producción como en el posconsumo bajo el escenario actual de no circularidad y bajo un escenario de potencial circularidad en base al trabajo de campo realizado. En el escenario actual, estos flujos residuales al encuadrarse legalmente como residuos industriales no especiales (RINEs) son dispuestos en relleno sanitario, privando al medio natural de la exergía solar necesaria para sostener su ciclo. Debido a la falta de compensación de las externalidades generadas por esta situación de vacío legal, surge la necesidad de asumir un escenario de circularidad y comparar la recuperación de eficiencia exergética de su potencial circularidad. Primeramente, se analiza la generación, la caracterización y el actual encuadre legal de estos flujos residuales para identificar cómo se ve afectada su circularidad. Posteriormente, se presentan los resultados de aplicar el ACVx de los referidos flujos residuales bajo el actual escenario de no circularidad. Luego, se presentan los resultados de aplicar el ACVx de estos flujos residuales bajo un escenario de potencial circularidad. Seguidamente, se plantea una reforma del marco legal basado en el alcance de los resultados bajo el escenario de potencial circularidad. Finalmente, se comparten una serie de reflexiones finales sobre cómo las externalidades ambientales generadas actualmente para estos flujos residuales pueden mitigarse a partir de un marco legal que facilite su potencial circularidad.

**Palabras Claves:** análisis de ciclo de vida exergético, vidrios de seguridad con polivinil butiral, marco legal de residuos industriales no especiales.

**ABSTRACT**

The present work aims at applying the exergetic approach to the life cycle analysis (LCA) of the residual flows of safety glass with polyvinyl butyral (PVB) originated both in production and in post-consumption under the current scenario of non-circularity and under a scenario of potential circularity based on the fieldwork carried out. In the current scenario, these waste streams are considered non-dangerous industrial waste, being disposed of in landfills. This deprives the natural environment of the solar exergy necessary to sustain its cycle. Due to the lack of compensation for externalities generated by shortcomings of the actual legal framework, a circular scenario was set up in order to compare the recovery of exergetic efficiency under conditions of potential circularity. First, the generation, characterisation and current legal framework of these waste streams are analysed to identify how their potential circularity is being affected. Subsequently, the results of the exergetic LCA of this waste system under the current non-circularity scenario are presented. Then, the results of the exergetic LCA under a potential circularity scenario are also presented. Next, general guidelines for legal reform are discussed based on the scope of the results under the potential circularity scenario. Finally, some final insights are shared to demonstrate how the environmental externalities currently generated by these waste streams might be mitigated by a legal framework for potential circularity.

**Keywords:** Exergetic life cycle analysis, safety glass with Polyvinyl Butyral, legal framework for non-dangerous industrial waste.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los flujos residuales con vidrios de seguridad con PVB tanto del sector automotriz como del sector arquitectónico a nivel local generan externalidades ambientales (Herrería, Servidio, y Jurado 2025), debido a que no califican como residuos especiales de acuerdo con la normativa vigente, y terminan siendo mayoritariamente dispuestos en rellenos sanitarios o en basurales a cielo abierto (Carucci y Herrería 2025). Así pues, los residuos de PVB no son reintroducidos productivamente a nivel local, desconociéndose que los mismos son materiales poliméricos valiosos que pueden ser reutilizados (Królikowski, Żach, y Kalestyński 2022).

Asimismo, el PVB puede ser separado mecánicamente del vidrio de seguridad, obteniéndose como producto final películas o escamas de PVB. No obstante, si bien este proceso resulta ser la mejor solución para el reciclaje del PVB, no removería las impurezas incrustadas en dicho material (Królikowski et al. 2022). Por otra parte, el PVB también puede ser separado químicamente por disolución del polímero con disolventes. Sin embargo, se generan complicaciones debido a la eliminación del plastificante y/o a la degradación durante el proceso de reciclaje, creándose así nuevos grupos funcionales del polímero, deteriorándose las propiedades del polímero, y cambios en la composición originadas por la pérdida del plastificante (Guner, Bulbul, y Dilsiz 2022).

Si bien la reinserción del PVB reciclado por ambos métodos no resulta totalmente viable en la fabricación de vidrios de seguridad dada la transformación entrópica de sus propiedades originales, puede ser reciclado por medios químicos, obteniéndose la fabricación de nanofibras electrohiladas, que pueden utilizarse en diversas aplicaciones tales como textil, revestimiento, filtración y absorción (Guner et al. 2022). No obstante, el potencial de reciclaje de PVB por medios químicos incurre en mayores costos exergéticos tanto al depender de sustancias químicas para su disolución como por la potencial emisión de compuestos orgánicos volátiles (COVs) (Królikowski et al. 2022).

Para abordar la problemática a nivel local, se decidió considerar el sistema de flujos residuales del entorno productivo de vidrios de seguridad con PVB del fabricante VASA S.A. para el sector arquitectónico y de Pilkington S.A para el sector automotriz y del cliente exclusivo reciclador de vidrios de seguridad FERBA S.A. tanto originados en la etapa de producción como en el posconsumo, incluyendo el sector de repuestería y de recambio. A tal efecto, se elaboraron cuestionarios técnicos respondidos por las empresas Pilkington S.A. y FERBA S.A. durante el año 2024, se efectuaron visitas técnicas a FERBA S.A. en los años 2024 y 2025 y se realizaron entrevistas semiestructuradas a informantes clave del sector durante el año 2024.

Por otra parte, se identificaron los vacíos legales existentes que no permiten una clasificación adecuada de estos RINEs para un mejor aprovechamiento de materia y energía en términos de eficiencia exergética, como asimismo la minimización de externalidades e impactos ambientales asociados a su no reintroducción productiva en el contexto local.

Esto permitió definir el sistema bajo estudio tanto para generar el escenario de no circularidad actual como el escenario de potencial circularidad del PVB y evaluar mediante el ACVx el impacto ambiental en términos de recuperación de eficiencia exergética como medida de sustentabilidad al comparar ambos escenarios a nivel local (Herrería et al. 2024). Por lo tanto, se identificaron los compuestos principales de cada flujo residual y se evaluó su valor de exergía y su cantidad asociada para generar una medida más robusta y objetiva de impacto ambiental en ambos escenarios, dado que en el ACVx los flujos de entrada y salidas se miden en una misma unidad de medida (Herrería et al. 2024).

Cabe indicar que, en el alcance del sistema bajo estudio definido, los otros RINEs identificados en este sistema residual de flujos residuales tales como plásticos ABS, policloruro de vinilo (PVC), hierro (Fe) y aluminio (Al) han sido considerados como salidas no útiles y no se analiza su reingreso al sistema productivo.

## 2. FLUJOS RESIDUALES DE VIDRIO DE SEGURIDAD CON PVB: GENERACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y ENCUADRE LEGAL.

En el caso bajo estudio (Figura 1), los flujos residuales de vidrios de seguridad con PVB se originan tanto en las etapas de producción como en la del posconsumo. En la etapa de producción, se generan como scrap de la fabricación de vidrios de seguridad de la empresa VASA S.A. para el sector arquitectónico y como scrap de la fabricación de vidrios de seguridad automotriz de la empresa Pilkington S.A., quien además genera rezagos de PVB virgen sobrante del recorte de sus parabrisas. El scrap de producción de ambas empresas es transportado a la empresa FERBA S.A. para separar

por un proceso de molienda mecánica el vidrio del PVB. Asimismo, el vidrio que recupera FERBA S.A. en forma de polvo ingresa como materia prima a los hornos de VASA S.A. El remanente del vidrio recuperado por FERBA S.A. se acumula *in situ* dentro del perímetro de su planta.

Por su parte, el PVB recuperado también se acumula dentro del predio de FERBA S.A. y al no encuadrar legalmente como un residuo industrial especial, se termina disponiendo como un residuo industrial asimilable a urbano caracterizado como RINE. Por ende, se dispone finalmente en relleno sanitario. En cuanto a los rezagos de PVB virgen indicados, se acumulan *in situ* en el predio de la planta de Pilkington S.A. debido a que hasta Enero del año en curso se encontraba prohibida su exportación. Al presente, Pilkington S.A. se encuentra en proceso de tramitar la exportación de este residuo a partir del cambio de normativa.

En la etapa de posconsumo, los flujos residuales de vidrios con PVB se originan más difusamente debido a la complejidad de los entornos de la repuestería y del recambio, identificándose tres subsectores. El primer subsector está conformado por las terminales automotrices y distribuidores oficiales que mantienen acuerdos comerciales con Pilkington S.A. para que sus flujos residuales de sus vidrios de seguridad con PVB poscomercializados sean transportados a FERBA S.A. para su molienda mecánica. A través de este proceso nuevamente se obtiene polvo de vidrio, que parte ingresa a los referidos hornos de VASA S.A. como materia prima, y otra parte también se acumula *in situ* dentro del predio de FERBA S.A. A su vez, el PVB recuperado de estos flujos residuales de poscomercialización de vidrios de seguridad con PVB automotriz con acuerdo comercial con Pilkington S.A. se acumula de igual mamera *in situ* en el predio de FERBA S.A., disponiéndose finalmente en relleno sanitario al ser también caracterizado como RINE. Cabe señalar, que los vidrios de seguridad con PVB de este subsector ingresan a FEBA S.A. con restos de materiales plásticos ABS, los cuales también al ser caracterizados como RINEs son dispuestos finalmente en relleno sanitario.

El segundo subsector se encuentra compuesto por los distribuidores de vidrios de seguridad automotriz con PVB sin acuerdo comercial con Pilkington S.A., los cuales generan flujos residuales de descarte de vidrio de seguridad con PVB con y/o sin residuos de plástico automotriz, disponiéndose en relleno sanitario y/o en basurales a cielo abierto sin mediar ningún proceso de logística inversa. Finalmente, el tercer subsector está conformado por los distribuidores de vidrios de seguridad con PVB del sector arquitectónico que, al no poseer ningún tipo de proceso de logística inversa, una vez que dichos vidrios son descartados como RINEs, también terminan siendo dispuestos en relleno sanitario y/o en basurales a cielo abierto.

En cuanto al encuadre legal del conjunto de estos flujos residuales, no existe una clasificación dentro de la legislación nacional que permita clasificarlos como RINEs, dado que de acuerdo con la misma los residuos en primera instancia se clasifican en urbanos, industriales, patogénicos y especiales. Si bien los RINEs podrían ser incluidos dentro de un grupo denominado domiciliarios, como subgrupo de los residuos urbanos no originados en la actividad industrial sino del propio ámbito, resulta actualmente imposible comprender a los RINEs dentro de esta categoría. Por lo tanto, existe un vacío legal al respecto que no permite una adecuada clasificación de los RINEs, en general, y en particular de estos flujos residuales bajo estudio. De igual forma, este problema de clasificación inhibe una vía legal y sustentable para su reciclaje, reintroducción y/o disposición final (Herrería et al. 2025). Asimismo, se observa que el referido vacío legal no garantiza la potencial circularidad de estos flujos residuales bajo estudio como, asimismo un mejor aprovechamiento de materia y energía y la minimización de externalidades e impactos ambientales a nivel local.

Por otra parte, estos vacíos legales inducen a que significativas cantidades de PVB al año se acumulen y terminen disponiéndose en rellenos sanitarios y/o en basurales a cielo abierto, aumentado la presión sobre el uso del suelo para su disposición final. En tal sentido, la primera implicación asociada a estos vacíos legales se refleja en las externalidades negativas debido a los costos sociales no compensados al medio ambiente y a los servicios ecosistémicos brindados por el suelo, básicamente por la ausencia de obligaciones legales de minimización, reducción en origen, recuperación y valorización de este tipo de residuos por parte de los generadores (Herrería et al. 2025). La segunda implicación, derivada de la anterior, resulta ser que su incorrecta caracterización dentro del marco normativo vigente no ofrece pautas de manejo y/o tratamiento para su potencial circularidad.

## 3. ANÁLISIS DE VIDA EXERGÉTICO DE LOS FLUJOS RESIDUALES DE VIDRIOS DE SEGURIDAD CON PBV BAJO ESCENARIO ACTUAL DE NO CIRCULARIDAD.

Habiéndose definido el sistema bajo estudio, se procedió a aplicar el ACVx al conjunto de flujos residuales identificados en la Figura 1. Al igual que el ACV convencional, el ACVx presenta cuatro fases. En la primera fase, se define el objetivo y el alcance. En la segunda fase, se realiza el inventario de las entradas y salidas, denominado inventario de ciclo de vida (ICV). En la tercera fase, se realiza la evaluación del impacto ambiental. Y finalmente, en la cuarta fase, se interpretan los resultados obtenidos. Dada la complejidad metodológica en el enfoque tradicional del ACV al asignar las cargas ambientales de los flujos de entradas y salidas en la elaboración del ICV en diferentes unidades de medida, el enfoque exergético aplicado al ACV presenta la ventaja de elaborar el ICV bajo una misma unidad de medida, y así, garantizar la interpretación de la evaluación del impacto ambiental de manera más objetiva y con menores niveles de sesgos introducidos por los factores de caracterización de los impactos ambientales en el ACV tradicional (Alvarenga et al. 2013; Carucci y Herrería 2025; Dewulf et al. 2007; Edwards 2011; Finnveden, Arushanyan, y Brandão 2016; Herrería et al. 2024; Ignatenko, van Schaik, y Reuter 2007; Laner et al. 2015; Niembro García y González Benítez 2009).

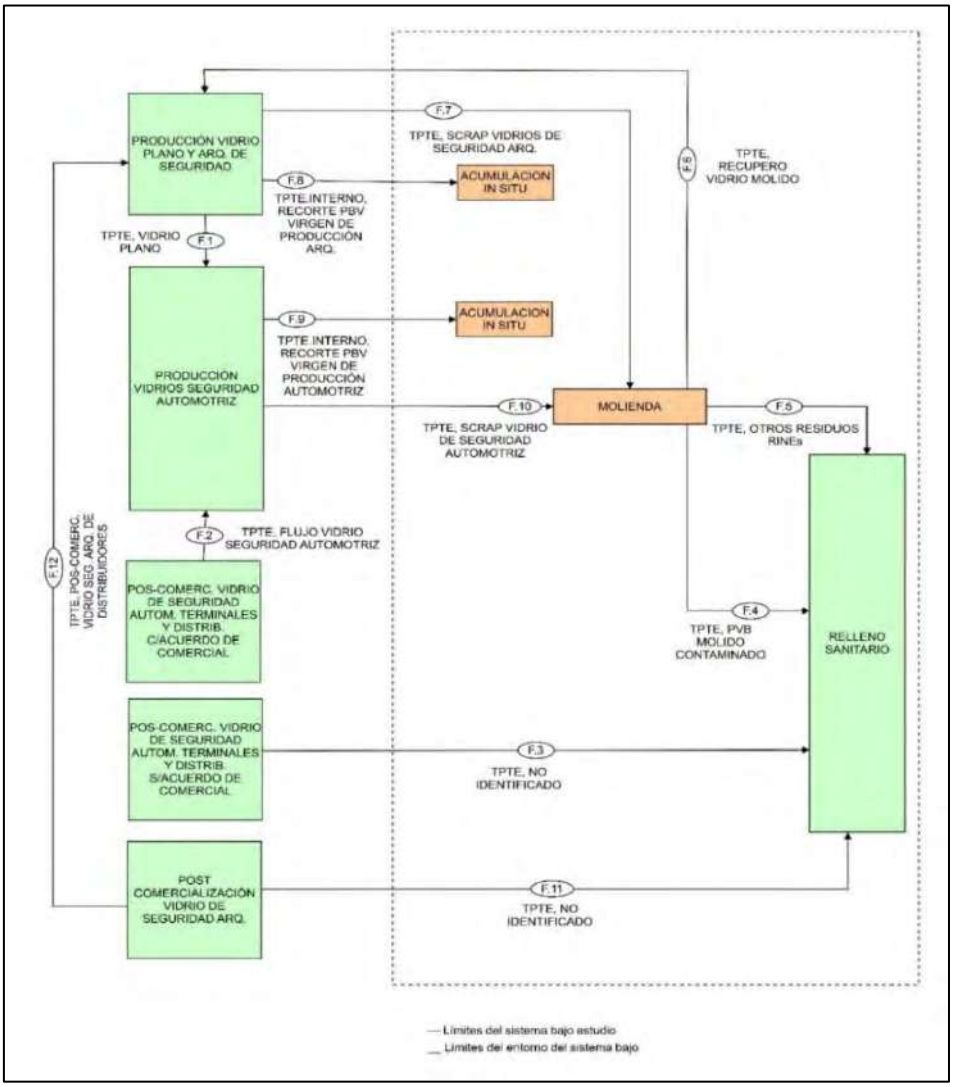



*Figura 1- Sistema bajo estudio en escenario actual de no circularidad.*

Para la primera fase de este ACVx, se definió como objetivo analizar en el escenario actual de no circularidad el nivel de eficiencia exergética de la recuperación de los flujos residuales del sistema conformado por el entorno productivo de vidrios de seguridad con PVB del fabricante VASA S.A. para el sector arquitectónico y de Pilkington S.A para el sector automotriz y del cliente exclusivo reciclador de vidrios de seguridad FERBA S.A. En cuanto al alcance representado en la Figura 1, se consideró tanto las etapas de producción como de posconsumo con sus respectivos tres subsectores mencionados en la sección precedente. Así pues, se evaluaron para cada flujo residual identificado en

la Figura 1 los compuestos principales más representativos para su determinación dada la caracterización para 1.000Kg de vidrio de seguridad de scrap de producción recibidos en el cliente exclusivo reciclador de vidrios de seguridad. Una vez definido el referido sistema bajo estudio en el actual escenario de no circularidad, se procedió a elaborar el inventario de ciclo de vida desde el enfoque exergético (ICVx), constituyéndose este proceso en la segunda fase del ACVx. En la Tabla 1, y a modo de síntesis, se presentan los tipos de flujos residuales identificados del sector automotriz, del sector arquitectónico, del reciclador y de la disposición, el proceso asociado ya sea producción o posconsumo, el flujo de materia o energía relacionado con el compuesto más representativo que lo caracteriza, y el valor de exergía evaluado en MJ (Carucci y Herrería 2025).

*Tabla 1 Escenario de no circularidad - Flujos residuales y sus compuestos representativos. Valores exergéticos asociados.*

| **Salidas útiles** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Tipo de Flujo** | **Proceso** | **Flujo de materia y energía** | **Compuestos representativos** | **Valor exergía cada 1000Kg (MJ)** |
| Molino | Producción | Vidrio | Vidrio | 153,12 |
| **Entradas** | | | | |
| **Tipo de Flujo** | **Proceso** | **Flujo de materia y energía** | **Compuestos más representativos** | **Valor exergía x 1000Kg (MJ)** |
| Automotriz | Producción | PVB | $(C_8H_{14}O_2)n$ | 978,8 |
| Automotriz | Producción | Vidrio | Vidrio | 45,93 |
| Automotriz | Producción | Aluminio | Al | 32,86 |
| Automotriz | Producción | Hierro | Fe | 7,033 |
| Automotriz | Producción | Plasticos duros | ABS | 20,33 |
| Automotriz | Producción | Diesel | $C_{12}H_{26}$ | 0,327 |
| Arquitectónico | Producción | PVB | $(C_8H_{14}O_2)n$ | 2167,7 |
| Arquitectónico | Producción | Vidrio | Vidrio | 107,2 |
| Arquitectónico | Producción | Aluminio | Al | 76,7 |
| Arquitectónico | Producción | Hierro | Fe | 16,4 |
| Arquitectónico | Producción | Plásticos duros | PVC | 47,4 |
| Arquitectónico | Producción | Diesel | $C_{12}H_{26}$ | 0,076 |
| Reciclador | Producción | Diesel | $C_{12}H_{26}$ | 1,461 |
| Reciclador | Producción | Energía eléctrica | MW-h | 17,082 |
| Reciclador | Producción | Tierra ocupada | ha.a | 16,493 |
| Reciclador | Producción | Diesel consumido | CO | 0,417 |
| Reciclador | Producción | Diesel consumido/Energía eléctrica | $CO_2$ | 3815,587 |
| Automotriz | Posconsumo | PVB | $(C_8H_{14}O_2)n$ | 2557,5 |
| Automotriz | Posconsumo | Vidrio | Vidrio | 125,86 |
| Automotriz | Posconsumo | Aluminio | Al | 91,38 |
| Automotriz | Posconsumo | Hierro | Fe | 19,554 |
| Automotriz | Posconsumo | Plásticos duros | ABS | 132,52 |
| Arquitectónico | Posconsumo | PVB | $(C_8H_{14}O_2)n$ | 63937,5 |
| Arquitectónico | Posconsumo | Vidrio | Vidrio | 3190 |
| Arquitectónico | Posconsumo | Aluminio | Al | 2282,438 |
| Arquitectónico | Posconsumo | Hierro | Fe | 488,4 |
| Arquitectónico | Posconsumo | Plásticos duros | PVC | 1411,781 |
| Disposición | Posconsumo | Tierra ocupada | ha.a | 318,256 |

Para realizar la tercer fase de este ACVx, y tomando los valores indicados, se efectuó el cálculo del valor de Recuperación de Eficiencia Exergética (REE) de la ecuación 1,

$$\frac{\text{Exergy (useful outputs)}}{\text{Exergy (inputs)}} \quad (1)$$

que surge de la sumatoria de los valores de exergía asociados a las salidas útiles sobre las entradas (Laner et al. 2015) relacionadas con el proceso de recuperación de los flujos residuales del sistema bajo estudio en el escenario actual de no circularidad. Así pues, el valor calculado resultó en 0,1869%, entendiéndose, 153,1MJ de salida útil sobre 81.907MJ de entradas caracterizadas. En cuanto a la cuarta fase, resultó posible interpretar con este valor obtenido cómo bajo este escenario actual de no circularidad la eficiencia exergética resultó ser exiguamente baja, debido a que solamente se reintrodujo productivamente el vidrio molido proveniente del scrap de producción y del sector de poscomercialización automotriz con acuerdo comercial; aunque, si bien el PVB de estos flujos residuales logró ser recuperado, su aporte al valor de la eficiencia exergética alcanzada terminó traduciéndose en una salida no útil, que impactó escasamente en el valor del denominador del cálculo de REE.

## 4. ANÁLISIS DE VIDA EXERGÉTICO DE LOS FLUJOS RESIDUALES DE VIDRIOS DE SEGURIDAD CON PBV BAJO ESCENARIO DE POTENCIAL CIRCULARIDAD.

Habiéndose obtenido el REE para el escenario actual de no circularidad, se procedió a identificar el potencial escenario de circularidad para este sistema bajo estudio. Por lo tanto, se asumió que además del scrap de producción de los vidrios de seguridad tanto del sector automotriz como arquitectónico y del sector posconsumo automotriz con acuerdo comercial, los restantes sectores de poscomercialización tanto del sector arquitectónico como del automotriz son transportados vía acuerdos de logística inversa al molino del reciclador cliente exclusivo para su recuperación y posterior reintroducción productiva como insumo para generar calor por medio de su incineración.

Cabe señalar que de acuerdo con los datos obtenidos en las visitas técnicas a este referido recuperador, existe en la actualidad un potencial cliente de este recuperador interesado en adquirir el PVB recuperado para generar calor en algunos procesos productivos de baja a media intensidad energética. Por ende, el supuesto en que se basa este potencial escenario de circularidad resulta en principio factible, asumiendo que el reciclador disponga de la capacidad técnico-productiva adecuada para la escala de volumen de PVB para recuperar.

En cuanto a la primera fase de este ACVx para este escenario de potencial circularidad, se consideró como objetivo evaluar el nivel de eficiencia exergética de la recuperación de los flujos residuales bajo los supuestos previamente mencionados, definiéndose de esta manera el alcance del escenario de potencial circularidad para este sistema bajo estudio visualizado en la Figura 2. Al igual que en el ACVx de la sección precedente, se evaluaron para cada flujo residual identificado en la Figura 2 los compuestos principales más representativos para su determinación dada la caracterización para 1.000Kg de vidrio de seguridad de scrap de producción recibidos en el cliente exclusivo reciclador de vidrios de seguridad. Posteriormente, se realizó la construcción del ICVx para este escenario de potencial circularidad, cumplimentándose así la tercera fase del ACVx.

A modo de síntesis, la Tabla 2 presenta los tipos de flujos residuales identificados del sector automotriz, del sector arquitectónico, del reciclador y de la disposición, el proceso asociado ya sea producción o posconsumo, el flujo de materia o energía relacionado con el compuesto más representativo que lo caracteriza, y el valor de exergía evaluado en MJ. Cabe destacar, que se considera la potencial recuperación de la totalidad de los vidrios de seguridad comercializados automotrices y de arquitectura. En cuanto a los flujos evaluados, no se pudo determinar al momento de esta publicación los volúmenes de CO y $CO_2$ producidos potencialmente al incinerar el PVB, siendo contemplado su calor aportado como recuperación de exergía.

Así pues y a partir de los valores calculados en el ICV, se procedió a realizar la tercera fase mediante el cálculo del REE, aplicando la señalada ecuación 1, que para este escenario se asumió la sumatoria de los valores de exergía asociados a las salidas útiles sobre las entradas asociados al proceso de recuperación total de los flujos residuales del sistema bajo estudio de la Figura 2. El valor calculado resultó en 44,25%, entendiéndose, 78.344MJ de salida útil sobre 177.051,5MJ de entradas caracterizadas. Con este valor de eficiencia exergética obtenido, resultó posible arribar a la cuarta fase de este ACVx, interpretándose que la recuperación en términos de eficiencia exergética de este potencial escenario resultaría significativamente más elevada, dado que de todos los flujos residuales, el PVB sería recuperado y reintroducido productivamente en forma de generación de calor. Incluso, en el supuesto caso de que la incineración de PVB incluyese como recurso consumido el CO y el $CO_2$, la

recuperación en términos de eficiencia exergética estaría alrededor del escenario actual, si los valores de exergía de ambos compuestos alcanzasen 6.000 veces el calor de la producida por la incineración; valor que resulta ser imposible técnicamente.

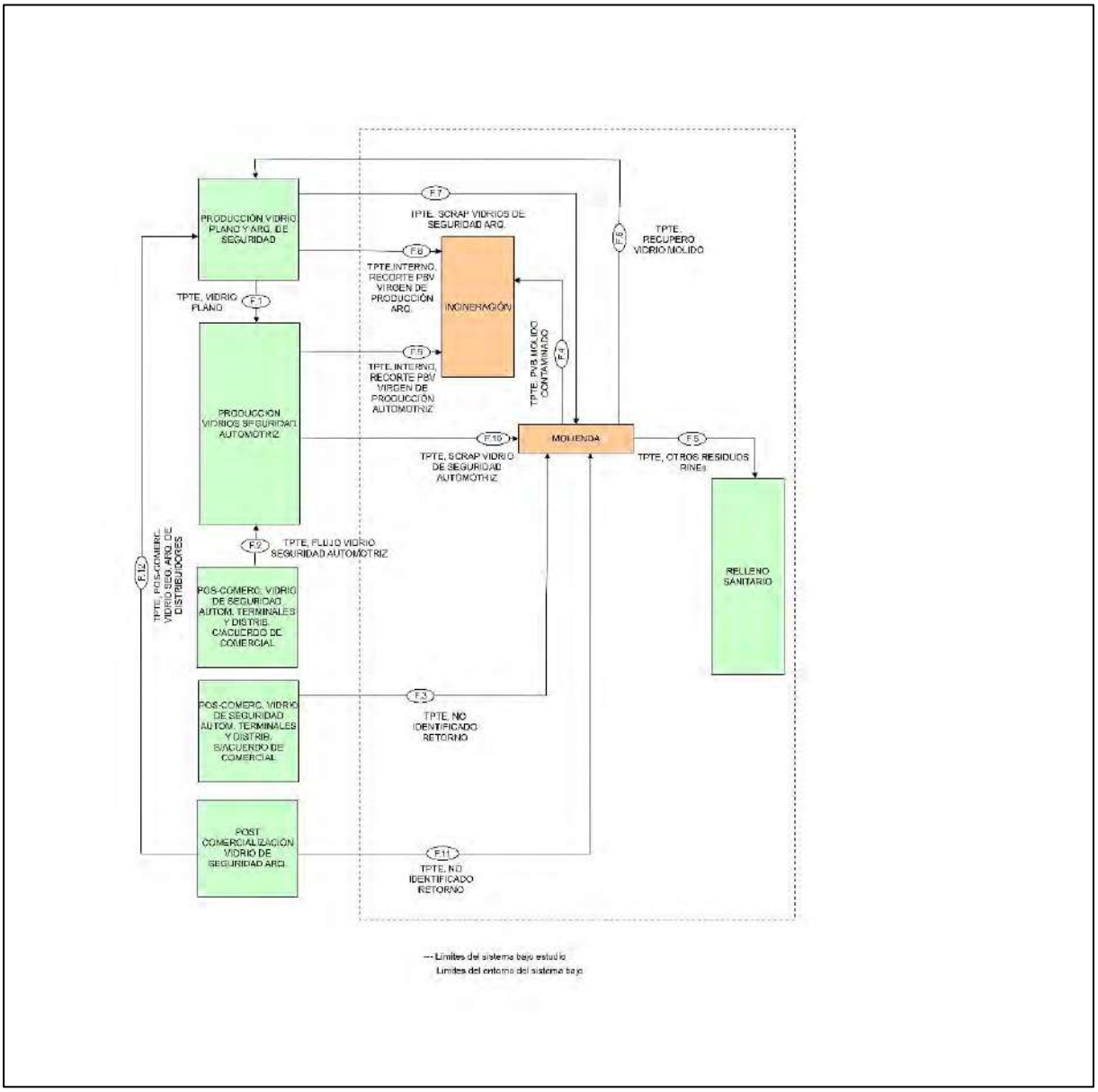



Figura 2- Sistema bajo estudio en escenario de circularidad.

.

*Tabla 2 Escenario de circularidad - Flujos residuales y sus compuestos representativos. Valores exergéticos asociados.*

**Salidas útiles**

| Tipo de Flujo | Proceso | Flujo de materia y energía | Compuestos representativos | Valor exergía cada 1000Kg (MJ) |
|---|---|---|---|---|
| Molino | Producción | Vidrio | Vidrio | 153,1 |
| Molino | Posconsumo | Vidrio | Vidrio | 3315,9 |
| Incineración | Posconsumo | Incineración PVB | Calor | 74875,0 |

**Entradas**

| Tipo de Flujo | Proceso | Flujo de materia y energía | Compuestos más representativos | Valor exergía x 1000Kg (MJ) |
|---|---|---|---|---|
| Automotriz | Producción | PVB | $(C_8H_{14}O_2)n$ | 978,8 |
| Automotriz | Producción | Vidrio | Vidrio | 45,9 |
| Automotriz | Producción | Aluminio | Al | 32,9 |
| Automotriz | Producción | Hierro | Fe | 7,0 |
| Automotriz | Producción | Plasticos duros | ABS | 20,3 |
| Automotriz | Producción | Diesel | $C_{12}H_{26}$ | 0,3 |
| Arquitectónico | Producción | PVB | $(C_8H_{14}O_2)n$ | 2167,7 |
| Arquitectónico | Producción | Vidrio | Vidrio | 107,2 |
| Arquitectónico | Producción | Aluminio | Al | 76,7 |
| Arquitectónico | Producción | Hierro | Fe | 16,4 |
| Arquitectónico | Producción | Plásticos duros | PVC | 47,4 |
| Arquitectónico | Producción | Diesel | $C_{12}H_{26}$ | 0,1 |
| Reciclador | Producción | Diesel | $C_{12}H_{26}$ | 1,5 |
| Reciclador | Producción | Energía eléctrica | MW-h | 17,1 |
| Reciclador | Producción | Tierra ocupada | ha.a | 16,5 |
| Reciclador | Producción | Diesel consumido | CO | 0,4 |
| Reciclador | Producción | Diesel consumido/Energía eléctrica | $CO_2$ | 3815,6 |
| Automotriz | Posconsumo | PVB | $(C_8H_{14}O_2)n$ | 2557,5 |
| Automotriz | Posconsumo | Vidrio | Vidrio | 125,9 |
| Automotriz | Posconsumo | Aluminio | Al | 91,4 |
| Automotriz | Posconsumo | Hierro | Fe | 19,6 |
| Automotriz | Posconsumo | Plásticos duros | ABS | 132,5 |
| Arquitectónico | Posconsumo | PVB | $(C_8H_{14}O_2)n$ | 63937,5 |
| Arquitectónico | Posconsumo | Vidrio | Vidrio | 3190,0 |
| Arquitectónico | Posconsumo | Aluminio | Al | 2282,4 |
| Arquitectónico | Posconsumo | Hierro | Fe | 488,4 |
| Arquitectónico | Posconsumo | Plásticos duros | PVC | 1411,8 |
| Reciclador | Posconsumo | Diesel | $C_{12}H_{26}$ | 49,9 |
| Reciclador | Posconsumo | Diesel consumido | CO | 11,2 |
| Reciclador | Posconsumo | Diesel consumido | $CO_2$ | 95028,4 |
| Reciclador | Posconsumo | Energía eléctrica | MW-h | 370,1 |
| Disposición | Posconsumo | Tierra ocupada | ha.a | 3,2 |
| Incineración | Posconsumo | Incineración PVB | CO | * |
| Incineración | Posconsumo | Incineración PVB | $CO_2$ | * |

## 5. REFORMA DEL MARCO LEGAL PARA SU POTENCIAL CIRCULARIDAD.

En base a lo demostrado en la sección anterior y como se señaló en cuanto a los vacíos legales relacionados con los flujos residuales del sistema bajo estudio, resulta pertinente identificar lineamientos asequibles para una reforma del marco legal que considere la potencial circularidad y minimizar las externalidades ambientales por medio de la evaluación de la recuperación de eficiencia exergética y poder establecer niveles de reintroducción productiva que no violen la termodinámica fundamental.

Para que, desde la arista legal, el potencial de circularidad de los flujos residuales del PVB recuperado pueda realizarse localmente, primero debería preguntarse si resulta posible adecuarse al marco legal vigente. En principio, se puede decir que sí, dado que, si bien no existe una regulación específica para los RINES, hay ciertas normativas, sobre todo a nivel de la Provincia de Buenos Aires, que podrían encuadrar como paliativas, y de ahí que podrían adecuarse. En primer lugar, cabe mencionar a la Ley N° 11.723 Integral del medio ambiente y de los recursos naturales. Esta ley trata la gestión de todo residuo que no esté incluido en las categorías de residuo especial, patogénico y radioactivo.

Asimismo, puede incluirse a la Ley de la Provincia de Buenos Aires N°11.720 de generación, manipulación, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de residuos especiales y su Decreto 806/1997, como asimismo resoluciones sobre residuos especiales, tal como la Resolución 63/1996 Transporte de residuos especiales y/o industriales. Esta resolución provincial entiende por residuo a cualquier sustancia u objeto, gaseoso (siempre que se encuentre contenido en recipientes), sólido, semisólido o líquido del cual su poseedor, productor o generador se desprenda o tenga la obligación legal de hacerlo, tal como sería el caso del scrap de producción de los fabricantes de vidrios de seguridad con PVB del entorno productivo en cuestión (Vasa S.A. y Pilkington S.A.).

Ahora bien y en el alcance de la legislación Argentina, los RINEs, tales como los flujos residuales de vidrios de seguridad con PVB, son aquellos generados en procesos productivos que no cumplen con las características de peligrosidad o de residuos sólidos urbanos, ni son considerados residuos de manejo especial (RME). Estos residuos son comúnmente gestionados a través de sistemas de recolección y disposición final, lo que se conoce en el área metropolitana comúnmente como relleno Sanitario en la Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado (CEAMSE), y pueden incluirse materiales como escombros, chatarra, cenizas, y otros materiales no peligrosos, como el PVB recuperado y los descartes de poscomercialización de vidrios de seguridad tanto del sector automotriz como del sector arquitectónico. Por ende, los RINEs se definen por exclusión, vale decir, no son residuos peligrosos que presentan características de riesgo para la salud o el ambiente, ni residuos sólidos urbanos generados en hogares (Herrería et al. 2025). Asimismo, no entran en la categoría de RME, que son aquellos que no son peligrosos, pero tampoco son residuos urbanos, o que son generados por grandes generadores de residuos urbanos.

Sin embargo, hay organismos gubernamentales, como el de la Provincia de Buenos Aires, que tratan de resolver, de manera provisoria, la gestión, tratamiento y desecho de estos residuos a través de normativas propias del Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS). Así pues, la Resolución Nº146/12 dice que los residuos industriales no especiales son aquellos elementos, objetos o sustancias generados por la actividad industrial que no se encuentren alcanzados por el régimen legal establecido por las Leyes Nacionales Nº11.720, N°11.347, ni los residuos radioactivos, que por sus características particulares en torno a la posibilidad de aprovechamiento y a su volumen, los residuos industriales no especiales deben ser objeto de una gestión diferenciada de los restantes sólidos urbanos. Esta posibilidad de recuperación y aprovechamiento que tienen los RINEs permite disminuir el volumen de residuos que iría a disposición final o relleno sanitario en CEAMSE, la cual a su vez atraviesa una situación crítica en cuanto a su capacidad remanente para recibir residuos. De ahí que cabría la posibilidad legal de que tanto el PVB recuperado como los descartes de poscomercialización de vidrios de seguridad tanto del sector automotriz como del sector arquitectónico pudiesen ser recuperados y disminuir el impacto ambiental generado por su disposición final en relleno sanitario y/o en basurales a cielo abierto mediante un marco legal de responsabilidad extendida del productor, considerando que siempre se generan más volumen de RINEs en las etapas de consumo y posconsumo.

También, no solo en estas normativas, sino en todas aquellas que versen sobre residuos, la adecuación puede encontrarse en lo que se denomina "disposiciones comunes". Las mismas se constituyen en una serie de artículos que resulta posible encontrar en cualquier legislación, las cuales dan la pauta de poder aplicarlos a todos aquellos casos, relacionados con la materia legislativa en cuestión, que no se encuentren en los articulados anteriores.

Por otro lado, no debe desdeñarse que, si bien es importante que los RINEs posean su propia legislación acorde a su categoría, se torna fundamental considerar, por un lado, a los flujos residuales en sí mismos como base, y por otra parte, a la REP para la recuperación de eficiencia en términos exergéticos tal como se demostró en la sección anterior. Por ende y basado en los resultados obtenidos del ACVx para ambos escenarios, la REP de los vidrios de seguridad con PVB debería incluir al PVB recuperado como a los descartes de poscomercialización de vidrios de seguridad del sector automotriz sin acuerdo comercial y del sector arquitectónico para alcanzar un mejor nivel de eficiencia exergética en comparación con el actual escenario de no circularidad.

En este sentido, cabe recordar las consideraciones mencionadas en relación con la eficiencia de los procesos de recuperación de materiales de desecho industriales y la normativa europea (Ignatenko et al. 2007). Las referidas consideraciones se basan en las exigencias de la Unión Europea (UE), en cuanto a los porcentajes de recuperación requeridos, observando que no siempre los estrictos objetivos de reciclaje resultan ser eficientes en cuanto a la carga que estos realizan sobre el medio ambiente, violando la termodinámica fundamental. En suma y a falta de regulación específica, lo que queda es contar con la normativa vigente, su adecuación a las disposiciones comunes y sus posibles reformas. De esta manera, resultaría posible hasta cierto punto disminuir las externalidades negativas y mitigar el desorden termodinámico generado por la ausencia de un marco normativo acorde, lo cual vendría a reconocer la elevada entropía de los diversos flujos residuales en el sistema bajo el escenario actual de no circularidad y cómo resulta posible la recuperación de estos flujos residuales en términos de eficiencia exergética en un potencial escenario de circularidad como se ha demostrado en la sección precedente.

## 6. CONSIDERACIONES FINALES.

La problemática asociada a cómo evaluar la eficiencia exergética del sistema de flujos residuales del entorno productivo de vidrios de seguridad con PVB para su potencial circularidad conlleva a reflexionar un repertorio de consideraciones que demuestran cómo un inadecuado marco legal inhibe mitigar el impacto ambiental asociados y los daños no compensados al ambiente, incluso cuando resulta posible estimar mediante el ACVx el impacto ambiental de su no circularidad en términos de recuperación de eficiencia exergética y compararlo con el escenario de potencial circularidad, sin desacatar la termodinámica fundamental.

Por una parte, el análisis del marco legal sobre los RINEs en general, y en especial sobre los RINEs de los flujos residuales del entorno productivo bajo análisis, demuestra que existe una discrepancia fáctica entre la existencia de una gestión inadecuada de estos residuos y el marco legal actual que, a partir de una indebida caracterización, produce vacíos legales para avanzar hacia un proceso de potencial circularidad y recuperación de eficiencia exergética. Asimismo, los motivos por los cuales se plasma esta discrepancia entre gestión y marco legal residen en que las bases normativas corresponden a una temporalidad en dónde el eje de ordenamiento jurídico se basaba en un paradigma que no contemplaba dentro de sus supuestos el desarrollo de tecnologías emergentes de recuperación de RINEs. Bajo el paradigma de la potencial circularidad que considera la no violación de la termodinámica fundamental, los RINEs deben poder verse caracterizados como materia o energía susceptibles de ser recuperados y reintroducidos productivamente a partir de una reforma del marco legal, generando así la posibilidad de ajustar el potencial de su circularidad dentro de la termodinámica fundamental.

Por otra parte, la aplicación del ACVx al sistema de flujos residuales del entorno productivo de vidrios de seguridad con PVB tanto en el escenario actual de no circularidad como en el escenario de potencial circularidad ha demostrado ser una metodología de evaluación de impacto ambiental que facilita la elaboración del ICV bajo una misma unidad de medida en sistemas residuales complejos como es el caso bajo estudio en ambos escenarios. De igual manera, se ha constatado que el valor obtenido de la eficiencia de recuperación de recursos en ambos sistemas residuales y en ambos escenarios, al basarse en el cociente entre la exergía de las salidas beneficiosas ambientalmente, en términos de mitigación entrópica, sobre el conjunto de las entradas al sistema, que denotan la extracción de alta entropía desde el medio ambiente, permite medir más robustamente el impacto ambiental en términos de evaluación de eficiencia exergética del sistema en cuestión, lo cual a su vez viene a resaltar cuáles son las pérdidas de exergía en el sistema bajo estudio en ambos escenarios. A partir de estimar la pérdida exergética para cada escenario, se ha puesto de manifiesto cómo la no circularidad de estos flujos residuales se asocia a un alto nivel de entropía en el sistema ambiental y cómo disminuye a partir

de su potencial circularidad, considerando incluso los costos de materia y energía de los procesos asociados a la reintroducción de los flujos residuales en cuestión.

Por último, cabe mencionar que la exergía perdida, más allá del inexorable proceso de degradación entrópica, podría ser interpretada como el costo ambiental no compensado socialmente, y que sigilosamente vendría a exteriorizar hasta qué punto se requiere de un marco legal de circularidad productiva en términos exergéticos de los diversos flujos residuales de vidrios de seguridad con PVB del entorno productivo analizado.

## 7. REFERENCIAS.


Alvarenga, Rodrigo A. F., Jo Dewulf, Herman Van Langenhove, y Mark A. J. Huijbregts. 2013. «Exergy-based accounting for land as a natural resource in life cycle assessment». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18(5):939-47. doi:10.1007/s11367-013-0555-7.

Carucci, Juan, y Elisabeth Herrería. 2025. «Revisión metodológica del inventario del ciclo de vida exergético aplicado a la recuperación de vidrios de seguridad con polivinil butiral». *Revista Digital del Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas* 10(1):1-10. doi:https://doi.org/10.54789/reddi.10.1.1.

Dewulf, J., M. E. Bösch, B. De Meester, G. Van der Vorst, H. Van Langenhove, S. Hellweg, y M. A. J. Huijbregts. 2007. «Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource accounting». *Environmental Science & Technology* 41(24):8477-83. doi:10.1021/es0711415.

Edwards, Chris. 2011. «An Exergy-Based Framework for Evaluating Environmental Impact». *Energy*. https://www.academia.edu/11431219/An_exergy_based_framework_for_evaluating_environmental_impact.

Finnveden, Goran, Yevgeniya Arushanyan, y Miguel Brandão. 2016. «Exergy as a Measure of Resource Use in Life Cycle Assessment and Other Sustainability Assessment Tools». *Resources* 5(3):23. doi:10.3390/resources5030023.

Guner, Burcu, Y. Emre Bulbul, y Nursel Dilsiz. 2022. «Recycling of polyvinyl butyral from waste automotive windshield and fabrication of their electrospun fibrous materials». *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 132:104136. doi:10.1016/j.jtice.2021.11.003.

Herrería, Elisabeth, Juan Carucci, Mauro Hernán Ricardo Vidal, y Vanina Gabriela Jurado. 2024. «La aplicación de la exergía al análisis de ciclo de vida. Un enfoque integrador para la medición de la sustentabilidad». *AACINI – Revista Internacional de Ingeniería Industrial* 4(1):57-73. https://riii.fi.mdp.edu.ar/index.php/AACINI-RIII/article/view/114/152.

Herrería, Elisabeth Ruth, Lucía Irene Servidio, y Vanina Gabriela Jurado. 2025. «Flujos residuales de vidrios de seguridad con polivinil butiral como externalidad ambiental. Vacíos legales para su potencial circularidad». *Revista Digital del Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas* 10(2):1-11.

Ignatenko, O., A. van Schaik, y M. A. Reuter. 2007. «Exergy as a tool for evaluation of the resource efficiency of recycling systems». *Minerals Engineering* 20(9):862-74. doi:10.1016/j.mineng.2007.03.005.

Królikowski, Marek, Piotr Żach, y Maciej Kalestyński. 2022. «Selection of Conditions in PVB Polymer Dissolution Process for Laminated Glass Recycling Applications». *Polymers* 14(23):5119. doi:10.3390/polym14235119.

Laner, David, Helmut Rechberger, Wouter De Soete, Steven De Meester, y Thomas F. Astrup. 2015. «Resource recovery from residual household waste: An application of exergy flow analysis and exergetic life cycle assessment». *Waste Management* 46:653-67. doi:10.1016/j.wasman.2015.09.006.

Niembro García, Isabel Joaquina, y María Margarita González Benítez. 2009. «Energía y exergía: enfoques hacia la sostenibilidad mediante el análisis de ciclo de vida».



# Eje 5
# Educación en la Ingeniería Industrial

# DESARROLLO DE COMPETENCIAS EN CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA: UN ENFOQUE DIDÁCTICO Y EXPERIMENTAL.

Minnaard Claudia, Torres Zulma, Ciuro Alejandro, Ramos Florencia, Díaz Juan
*Instituto de Investigaciones de Tecnología y Educación, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora*
minnaardclaudia@gmail.com, iite@ingenieria.unlz.edu.ar, alejandroiciuro@gmail.com, s.florencia.ramos@gmail.com, juanediaz27@gmail.com

**RESUMEN**

El Control Estadístico de Procesos (CEP) es una disciplina fundamental para la optimización de la calidad y la eficiencia en cualquier sector industrial, siendo una herramienta esencial en la formación de ingenieros modernos. Se presentan los resultados de una investigación enfocada en el desarrollo de competencias en CEP entre estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (FIUNLZ). Se analizó la efectividad de un enfoque didáctico y experimental que combina la teoría con la aplicación práctica en entornos simulados y reales. Cabe destacar que, si bien el diseño focaliza en los estudiantes de grado de la FIUNLZ, se ha adaptado la propuesta a la Educación Técnico Profesional y al posgrado con distinto grado de complejidad.
La metodología implementada incluyó el uso de software especializado para el análisis de datos y la resolución de casos de estudio basados en escenarios industriales complejos. Un componente crucial fue la realización de prácticas de laboratorio donde los estudiantes pudieron diseñar y monitorear procesos, identificar fuentes de variación y proponer soluciones basadas en el CEP.
Los hallazgos revelan una mejora significativa en la comprensión teórica y la habilidad práctica de los estudiantes para aplicar las herramientas del CEP, como los gráficos de control, el análisis de capacidad de proceso y la implementación de planes de muestreo. Se observó un incremento en la capacidad analítica y de toma de decisiones ante situaciones problemáticas reales, lo que sugiere que la exposición a un entorno experimental potencia el aprendizaje y la retención del conocimiento. El estudio subraya la importancia de integrar estrategias didácticas innovadoras y experiencias prácticas en la enseñanza del CEP. Al fomentar un aprendizaje activo y basado en la experimentación, se fortalece la formación de ingenieros competentes y preparados para enfrentar los desafíos de calidad y productividad en la industria.

**Palabras Claves:** Control Estadístico de Procesos (CEP), Competencias, Gráficos de control.

**ABSTRACT**

Statistical Process Control (SPC) is a fundamental discipline for optimizing quality and efficiency across all industrial sectors, making it an essential tool in the education of modern engineers. This paper presents the results of a research study focused on the development of SPC competencies among engineering students at the Faculty of Engineering, National University of Lomas de Zamora (FIUNLZ). We analyzed the effectiveness of a didactic and experimental approach that combines theory with practical application in simulated and real-world environments. Notably, while the design primarily targeted undergraduate students at FIUNLZ, the proposal was adapted with varying degrees of complexity for Professional Technical Education and postgraduate studies.
The implemented methodology included the use of specialized software for data analysis and the resolution of case studies based on complex industrial scenarios. A crucial component was laboratory practicals where students could design and monitor processes, identify sources of variation, and propose solutions based on SPC principles.
The findings reveal a significant improvement in students' theoretical understanding and practical ability to apply SPC tools, such as control charts, process capability analysis, and the implementation of sampling plans. An increase in analytical capacity and decision-making skills in real-world problem situations was observed, suggesting that exposure to an experimental environment enhances learning and knowledge retention. The study underscores the importance of integrating innovative didactic strategies and practical experiences into SPC education. By fostering active, experimentation-based learning, the training of competent engineers prepared to address industrial quality and productivity challenges is strengthened.

**Keywords:** Statistical Process Control (SPC), Competencies, Control charts

## 1. INTRODUCCIÓN

El Control Estadístico de Procesos CEP proporciona herramientas que permiten monitorear la variabilidad de los atributos o las especificaciones del producto o servicio (variables). Cada atributo o característica de calidad contribuye a la calidad general del producto o servicio. El objetivo del CEP es supervisar las etapas de producción, o de prestación del servicio, para identificar las causas de variación asignables (no aleatorias), responsables del aumento de unidades defectuosas.

Dado que la variación asignable por lo general es corregible, con los diagramas de control y demás técnicas, CEP proporciona una guía para la toma de decisiones: investigar el problema y encontrar la causa.

En este proyecto se plantea analizar distintos procesos que se utilizan en la industria. Los estudiantes reciben datos reales o simulados de este proceso y deben aplicar las herramientas de Calidad, como los gráficos de control y análisis de capacidad, para conocer el estado del proceso y evaluar la calidad del producto final.

El Control Estadístico del Proceso (CEP), también conocido por sus siglas en inglés SPC (Statistical Process Control), se define como un conjunto integral de metodologías, técnicas y acciones implementadas por una organización con el propósito fundamental de garantizar la manufactura de productos o la prestación de servicios que cumplan consistentemente con estándares de calidad predefinidos. (Lind, D. y otros (2012); Montgomery, D. y otro (2003); Triola, M. (2018)).

La aplicación del CEP se inicia en la fase de planificación del producto, específicamente durante la especificación de los atributos inherentes al producto o servicio. Esta práctica se extiende y mantiene activa a lo largo de toda la etapa de producción. Cada atributo, en cada fase del proceso productivo, contribuye de manera significativa a la calidad global del producto o servicio final. Para optimizar la efectividad del control de calidad, es imperativo identificar y detallar características críticas y especificaciones mensurables contra las cuales se cotejarán los atributos reales del producto o servicio.

Es importante reconocer que, en el contexto de un proceso industrial, la variabilidad es una condición inherente. Diversos factores de naturaleza aleatoria influyen en la producción, imposibilitando la creación de dos productos idénticos. En consecuencia, las características del producto manufacturado no son uniformes y exhiben un grado de variabilidad.

La definición moderna de calidad indica que "*La calidad es inversamente proporcional a la variabilidad*".

Esto implica que, si la variabilidad de las características importantes de un producto disminuye, la calidad del producto o servicio aumenta. (Montgomery, D. y otro (2003))

Esta variabilidad es claramente indeseable y el objetivo ha de ser reducirla lo más posible o al menos mantenerla dentro de unos límites.

El Control Estadístico de Procesos es una herramienta útil para alcanzar este segundo objetivo. Dado que su aplicación es en el momento de la fabricación, puede decirse que esta herramienta contribuye al mejoramiento de la calidad. Permite también aumentar el conocimiento del proceso, lo cual en algunos casos puede dar lugar a la mejora del mismo.

En un proceso hay dos fuentes generales de variación:

Las causas comunes de variación representan la variabilidad inherente que existe en un proceso. Estas fluctuaciones consisten en numerosas pequeñas causas de variabilidad que operan aleatoriamente o por casualidad. También se las designa como causas aleatorias de variación.

Las causas especiales de variación representan grandes fluctuaciones o patrones en los datos que no son inherentes al proceso. Estas fluctuaciones a menudo son causadas por cambios en el proceso que representan problemas para corregir u oportunidades para aprovechar. Y se las designa como causas asignables de variación. (Carro Paz, R. y otro (2014), Gutiérrez Pulido, H. y otro (2013). Lind, D. y otros (2012); Montgomery, D. y otro (2003); Triola, M. (2018)).

Los diagramas de control identifican el momento en que entran al proceso las causas asignables de variación o los cambios.

Hay dos tipos de diagramas de control:

Un diagrama de control de variables representa mediciones, como la cantidad de refresco de cola en una botella de dos litros o el diámetro exterior de una tubería. Este diagrama requiere un intervalo o escala de razón de medición.

Un diagrama de control de atributos clasifica un producto o servicio como aceptable o inaceptable. Se basa en la escala de medición nominal.

Se utilizan para variables categóricas o discretas: un electrodoméstico funciona o no funciona; el servicio de ventas online cumple con la entrega o no cumple.

De las 7 herramientas de la calidad dependiendo de los diferentes autores existen ligeras variaciones en la clasificación, e incluso se describen las mismas herramientas de distintas formas. De estas 7 hay 4 que responden a los contenidos estadísticos. (Figura 1)

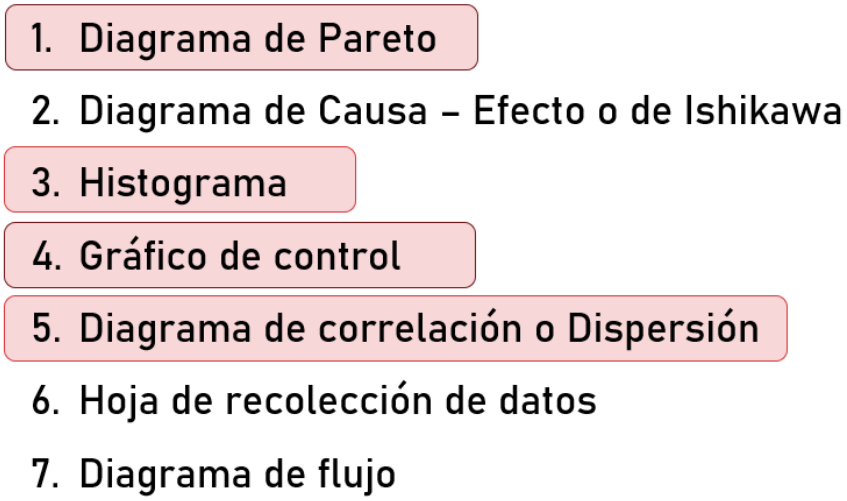



*Figura 1: Las 7 herramientas de la calidad*

**2. DESARROLLO**

La inclusión de los contenidos de CEP en la cátedra de Probabilidad y Estadística de la FIUNLZ surge a partir del plan de trabajo de un becario de las Becas a las Vocaciones Científicas (EVC – CIN) en el año 2020. Las herramientas adquiridas por el becario fueron posteriormente implementadas en su trabajo profesional.

En el presente trabajo se muestra el Laboratorio de CEP realizado en el primer cuatrimestre 2025. En línea con las aplicaciones del CEP en la ingeniería, la cátedra de Probabilidad y Estadística promueve el desarrollo del pensamiento estadístico entre sus estudiantes, aportando las nociones y herramientas del CEP, con el fin de mejorar los sistemas productivos de una organización. Por otro lado, es frecuente que las prácticas de laboratorio estén limitadas al análisis de alguna característica de piezas manufacturadas: pero esta metodología didáctica no permite representar las situaciones típicas que afrontaran los futuros ingenieros en los diferentes procesos de manufactura reales. De modo que la cátedra implementa una práctica de laboratorio donde aplicar metodologías de construcción de gráficos de control, realizar el análisis de estabilidad y el análisis de capacidad de un proceso en un caso práctico: incorporando la asistencia de medios tecnológicos con la capacidad de ejecutar análisis estadísticos útiles en la práctica profesional moderna.

El objetivo del Laboratorio es desarrollar las habilidades en el uso de software asistentes (Minitab y/o MegaStat) para resumir y obtener las métricas clave, con una matriz de datos recolectados, de las variables de interés o características de calidad, así como para la correcta interpretación de los resultados obtenidos al representar gráficos de CEP u otro recurso estadístico entre las herramientas de la calidad. Pensar en forma estadística implica tomar información del proceso para conocerlo (análisis adecuado de los datos), y actuar de acuerdo con ese aprendizaje para mejorar su calidad (acción, para reducir su variabilidad).

El Control Estadístico de Procesos (SPC) tiene como objetivo hacer predecible un proceso en el tiempo. Las herramientas usadas para este fin son las gráficas de control que permiten distinguir las causas especiales de las causas comunes de variación. (R. Carro Paz & D. González Gómez. (2014)). Una vez eliminadas las causas especiales, se logra un proceso estable o bajo control estadístico; es decir, un proceso predecible y afectado exclusivamente por causas aleatorias de variación.

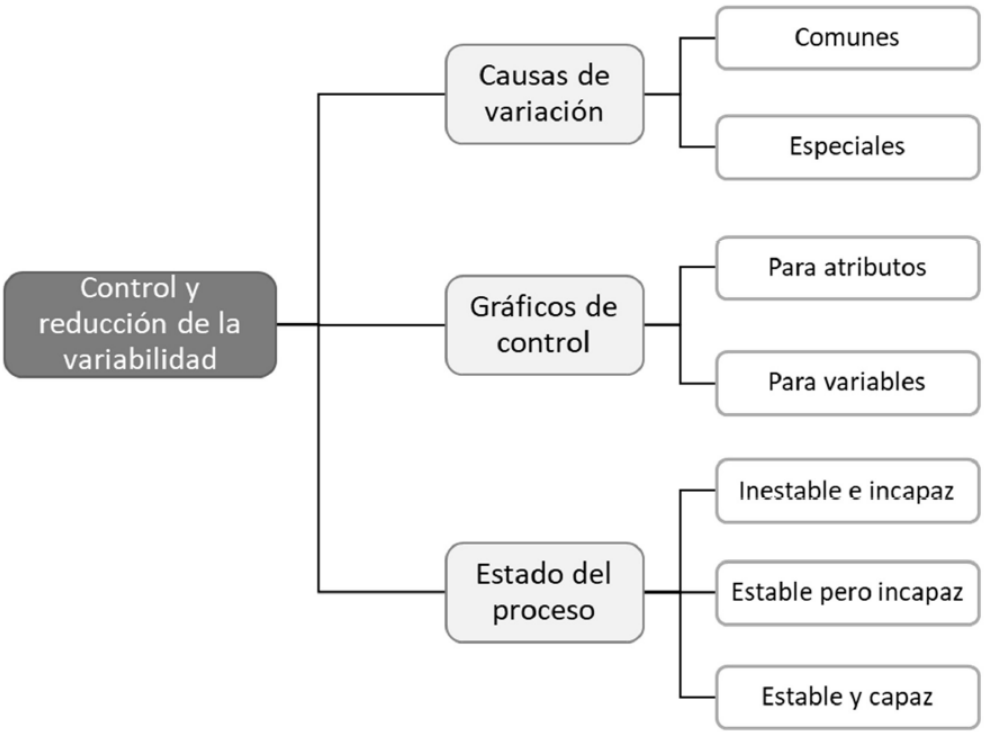



*Figura 2: Control y reducción de la variabilidad*

El Coeficiente Cp es un indicador de la capacidad potencial del proceso que resulta del cociente entre el ancho de las especificaciones (variación tolerada: Ts – Ti) y la amplitud de la variación natural del proceso (6σ).
En tanto que el Coeficiente Cpk es un indicador de la capacidad real de un proceso que se puede ver como un ajuste del índice Cp para tomar en cuenta el centrado del proceso.

$$C_{pk} = Mín\left\{\frac{\mu - Ti}{3\sigma}; \frac{Ts - \mu}{3\sigma}\right\}$$

Fórmula 1: Cálculo del Cpk

*Tabla 1: Valores de Cp y su interpretación*

- Valores de Cp y su interpretación

| Valor **Cp** | % Libre de defectos | PPM Defectuosos | Decisión, si el proceso está centrado |
|---|---|---|---|
| $C_p \geq 2$ | $99.\hat{9}$ | < 0.02 | Capaz: se tiene calidad Seis Sigma |
| $C_p \geq 1.33$ | $99.\hat{9} - 99.994$ | < 60 | Capaz: adecuado |
| $1 \leq C_p < 1.33$ | 99.73 - 99.994 | < 2699 | Parcialmente capaz: requiere un control estricto |
| $0.67 < C_p < 1$ | 99.73 - 95.45 | < 45500 | Incapaz: requiere análisis del proceso; y modificaciones serias. |
| $C_p \leq 0.67$ | < 95.45 | > 45500 | Incapaz: requiere acciones muy serias. |

Esta práctica de laboratorio propone trabajar con grupos de estudiantes de no más de 5 integrantes. Los estudiantes previamente, tienen recorrido el material sobre Control Estadístico de Procesos, en el aula virtual de la cátedra. Y los grupos deben contar con: la Guía de Trabajo, el archivo de la Base de datos compartida y al menos un computador portátil.
Los contenidos y tiempos del Laboratorio se describen a continuación:

- Introducción a la práctica de CEP
- Presentación del Caso 1
- Explicación de las funciones de estadística en el entorno de Minitab
- Análisis y solución del problema de acuerdo a las salidas de Minitab
- Presentación del Caso 2
- Explicación de las funciones de estadística en el entorno de Minitab
- Análisis y solución del problema de acuerdo a las salidas de Minitab
- Cierre: Elaboración del borrador del informe con resultados de cada grupo
- Duración de la práctica: 90 minutos.

Para la evaluación de este bloque temático, cada grupo de trabajo presenta en la siguiente clase el Informe de resultados con las conclusiones de los problemas propuestos de forma exhaustiva.
Los dos casos desarrollados en clase se presentan a continuación:

**CASO 1**

En un proceso de inyección de plástico una característica de calidad del producto (disco) es su grosor, que debe ser de 1.20 mm con una tolerancia de ± 0.10 mm. Así, para considerar que el proceso de inyección fue satisfactorio, el grosor del disco debe estar entre la especificación inferior, Ti = 1.10 y la superior, Ts = 1.30.
En un estudio de capacidad para este proceso es necesario contestar los siguientes interrogantes: ¿qué tipo de discos en cuanto a grosor se están produciendo? ¿El grosor medio es adecuado? ¿La variabilidad del grosor es estable o inestable? ¿El proceso es capaz o incapaz?
Para contestar estas preguntas, durante una semana se obtuvieron de una línea de producción los 125 datos de la planilla “Grosor Disco 100”. El muestreo fue sistemático: cada determinado tiempo se tomaban cinco productos y se medían, así al final de la semana se tuvieron los datos referidos. (Se les adjunta a los estudiantes una base de datos en Excel)

**CASO 2**

Se aplica un programa de control de calidad para un proceso, donde se fabrican grandes placas de acero, con un interés especial por los defectos superficiales. El objetivo es establecer una gráfica de control de calidad para el número de defectos por placa. Los datos se presentan a continuación, junto a la información sobre el tipo de defecto observado. (Se les adjunta a los estudiantes una base de datos en Excel)
a) Elabore las gráficas de control apropiadas utilizando esta información. Explique su elección.
b) Determinar el número medio de defectos superficiales, la dispersión y los límites de control.
c) En el proceso actual ¿Sobre qué problemas hay que diseñar acciones? Elaborar las recomendaciones del caso con base en la eficacia de su aplicación.

A partir del desarrollo exhaustivo de los dos casos presentados, se les propone a los estudiantes en el primer cuatrimestre 2025 el siguiente caso:

***CASO: Estudio de Control Estadístico de Procesos en línea de producción industrial.***

Una empresa dedicada a la fabricación de componentes metálicos desea llevar a cabo un estudio de Control Estadístico de Procesos (CEP) para analizar la variabilidad y estabilidad de su línea de producción. Se tomaron 200 muestras aleatorias de piezas fabricadas, registrando 10 variables físicas, térmicas y de proceso que podrían afectar la calidad del producto. Cada una de estas variables cuenta con una tolerancia preestablecida, definida en función de los requisitos técnicos y de calidad del producto.

El objetivo del estudio es responder interrogantes fundamentales como:

¿Las variables medidas se encuentran dentro de los límites de especificación?
¿El proceso presenta estabilidad a lo largo del tiempo?
¿Las condiciones actuales del proceso garantizan la calidad del producto?
¿El proceso es capaz de producir de manera consistente dentro de los rangos establecidos?

A través del análisis estadístico correspondiente, se buscará obtener un diagnóstico integral del proceso productiva, que permita identificar oportunidades de mejora y garantizar la eficiencia y calidad en la fabricación de componentes.

| Medida del espesor del producto final | Peso total de la pieza producida | Resistencia mecánica del material | Duración del proceso de fabricación de la pieza | Temperatura del entorno donde se produce | Humedad del aire en el entorno del proceso | Velocidad con la que se mueve la pieza en la línea | Presión aplicada durante el modelado o inyección | Volumen de líquido refrigerante utilizado | Tiempo necesario para enfriar la pieza antes del siguiente paso |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Espesor (mm)** | **Peso (g)** | **Resistencia (MPa)** | **Tiempo de Fabricacion (s)** | **Temperatura ambiente (°C)** | **Humedad relativa (%)** | **Velocidad de cinta transportadora (m/min)** | **Presión de Inyección (Bar)** | **Caudal de refrigeración (L/min)** | **Tiempo de enfriamiento (s)** |

Tabla 2: Variables estudiadas

**Tabla de tolerancias de las variables a analizar**

| Variable | Tolerancia | Unidad |
|---|---|---|
| **Espesor** | 5 ± 0,1 | mm |
| **Peso** | 200 ± 30 | g |
| **Resistencia** | 300 ± 60 | MPa |
| **Tiempo de Fabricación** | 120 ± 15 | seg |
| **Temperatura ambiente** | 23 ± 9 | °C |
| **Humedad relativa** | 50 ± 15 | % |
| **Velocidad de cinta transportadora** | 3 ± 4 | m/min |
| **Presión de Inyección** | 55 ± 10 | bar |
| **Caudal de refrigeración** | 17 ± 3 | L/min |
| **Tiempo de enfriamiento** | 10 ± 8 | seg |

*Tabla 3: Variables estudiadas - Tabla de tolerancias*

Algunas de las resoluciones de los estudiantes:
El ejemplo que se muestra corresponde a la variable temperatura ambiente, los estudiantes organizados en grupos de 5 debían analizar en forma exhaustiva la variable que les fue asignada.

**CASO ESTUDIADO POR UNO DE LOS GRUPOS DE TRABAJO**

Se considera que la temperatura de ambiente debe ser de 23 °C, con una tolerancia de ±9 °C. Por lo tanto, para que el proceso de producción sea considerado satisfactorio, la temperatura ambiente debe encontrarse dentro del rango especificado, es decir, entre un límite inferior Ti = 14 °C y un límite superior Ts = 32 °C.

Condiciones de la temperatura ambiente:

- Variable X: Temperatura ambiente (°C)
- Especificación: 23 ± 9°C
- Datos muestrales:
    - Tamaño de muestra: N = 200
    - Media muestral: $\bar{x}$ = 22,8402°C
    - Desvío estándar muestral: S = 8,6956°C
    - Desvío estándar poblacional estimado: σ = 2,9488°C
    - Coeficiente de simetría: 0,0863
    - Máximo: 27,87°C
    - Mínimo: 18,06°C

Según los resultados obtenidos mediante el software estadístico, el coeficiente de simetría es menor que cero, por lo que la distribución de los datos es asimétrica positiva (sesgada a la derecha). También

lo es el valor de curtosis, de -1,2894, lo que indica una distribución platicúrtica (más achatada que la normal). En cuanto a la variabilidad relativa, el coeficiente de variación (CV) es de 12,91 %, lo que sugiere que los datos son heterogéneos. Además, la media aritmética de 22,8402 °C no resulta representativa del conjunto de datos debido a la dispersión y a la presencia de valores atípicos.

**BoxPlot**

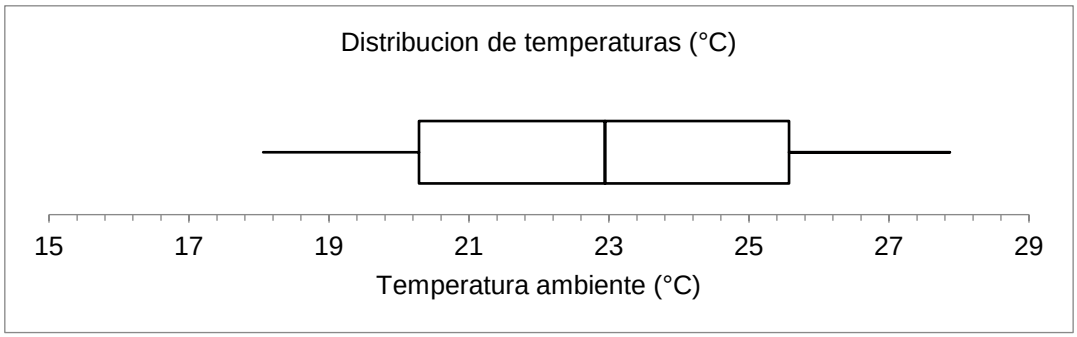



*Figura 3: Boxplot correspondiente a la variable Temperatura ambiente*

La media indicada por los softwares MegaStat y Minitab es de 22,8402 °C, valor que se encuentra dentro del rango de tolerancia establecido para la temperatura (23 ± 9 °C). Además, el diagrama de caja (boxplot) muestra que la totalidad de los datos de la muestra se ubican dentro de los límites especificados, es decir, no hay valores por debajo de 14 °C ni por encima de 32 °C.

**Estabilidad y control del entorno:**
El rango entre 21 °C y 24 °C podría considerarse el intervalo de mayor estabilidad y control del ambiente, dado que en él se agrupa la mayoría de los registros.

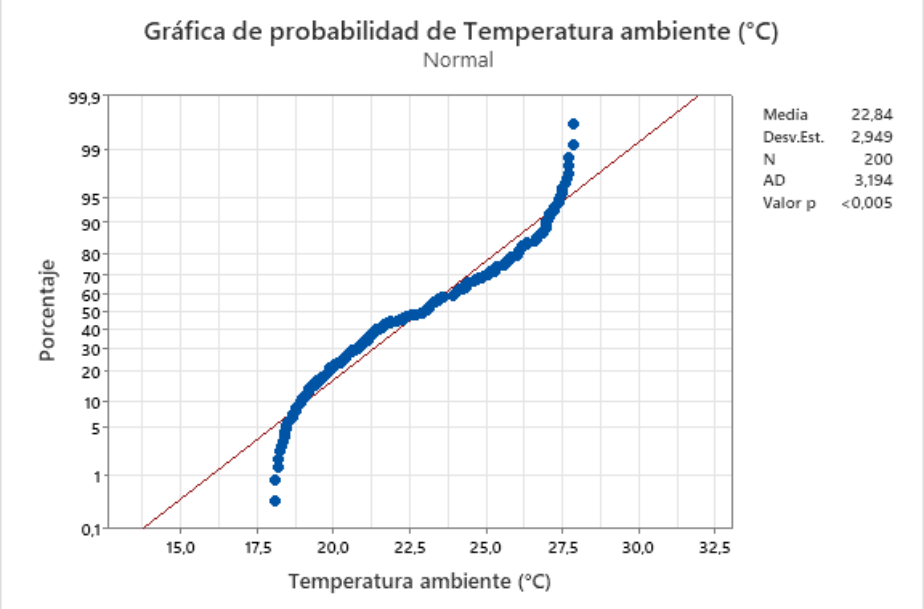



*Figura 4: Gráfica de probabilidad de la variable Temperatura ambiente*

Nivel de significación de la prueba: $\alpha$ = 0.05
Hipótesis nula y alternativa
$H_0$ : sigue distribucion normal
$H_1$ : no sigue distribucion normal

Regla de decisión:

Si el Valor p < $\alpha$ = 0.05 Rechazo $h_0$

Decisión estadística:

Como p-valor ≅ 0,0049 < 0.05 lo que significa que se rechaza $h_0$, por lo tanto, hay evidencia estadística que los datos no provienen de una población con distribución normal.

Se realizaron dos gráficos de probabilidad normal (un diagrama de media y un diagrama de rangos) para evaluar la distribución de un conjunto de 200 datos de temperatura ambiente. En ambos gráficos se observa que los puntos presentan una desviación sistemática respecto a la línea recta teórica, especialmente en los extremos. Esta desviación sistemática significa que los datos se alejan de manera consistente de la línea de referencia en el gráfico, lo cual sugiere que existe una estructura en los datos que no concuerda con la forma esperada de una distribución normal. Esta curvatura en forma de "S" es indicativa de que los datos no se ajustan a una distribución normal. Esta observación concuerda con lo evidenciado en el histograma, donde también se aprecia una distribución asimétrica. La segunda gráfica incluye los resultados de la prueba de Anderson-Darling, arrojando un estadístico AD=.194 y un valor p < 0.005. Este valor p proporciona evidencia estadísticamente significativa para rechazar la hipótesis nula de normalidad, confirmando que los datos no siguen una distribución normal.

En resumen, tanto la inspección visual de los gráficos como los resultados estadísticos indican que la distribución de temperatura ambiente no es normal. Este hallazgo es importante y debe ser considerado al seleccionar las técnicas estadísticas adecuadas para el análisis posterior, recomendándose el uso de métodos no paramétricos si se requiere asumir normalidad.

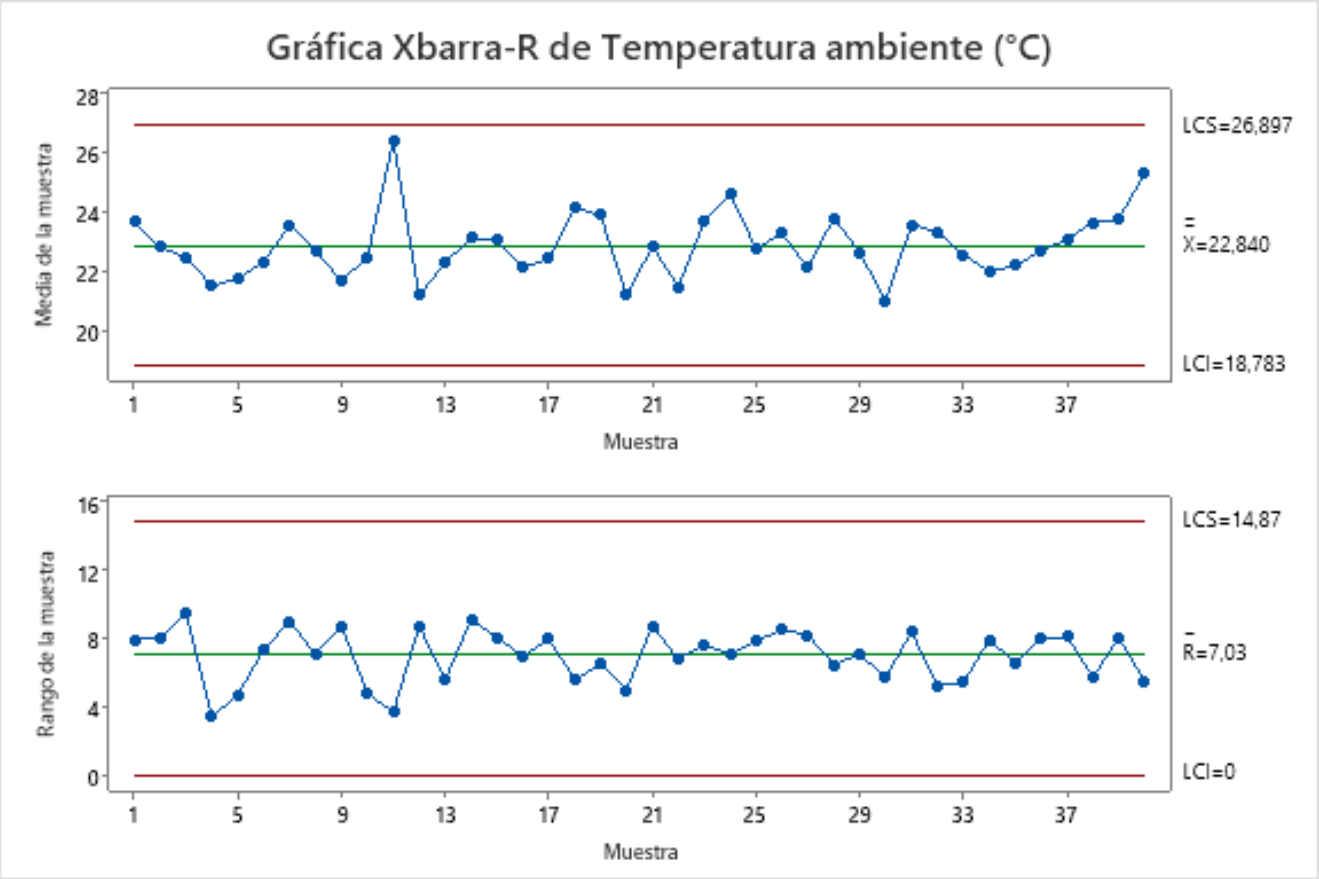



*Figura 5: Gráfica de medias y Gráfica de rangos*

Tanto la gráfica de la media como la de rangos indican que el proceso es estable desde el punto de vista estadístico, ya que no se observan puntos fuera de los límites de control. Esto sugiere que no hay presencia de cambios significativos o fuera de control en el proceso, indicando que se cumple con las condiciones requeridas para un entorno de producción adecuado. Se espera que los rangos de la

temperatura ambiente del entorno donde se produce varíen de 0 a 14,47°C. Y se espera que las medias de la temperatura varíen de 18,783°C a 26,897°C.

Medidas de la capacidad del proceso:

Cuando se analiza la capacidad del proceso respecto a las especificaciones del cliente (temperatura objetivo de 23°C con tolerancia ±9°C, es decir, TI = 14°C y TS = 32°C), se obtienen los siguientes indicadores:

Coeficiente de capacidad de proceso (comparar la capacidad del proceso y la amplitud de las tolerancias a satisfacer):

$$Cp = \frac{TS - TI}{6\sigma} = \frac{32 - 14}{6\ .\ 2{,}9488} = 1{,}01735102$$

$$1 \leq Cp \leq 1{,}33$$

$$1 \leq 1{,}01735102 \leq 1{,}33$$

Este valor indica que el proceso es parcialmente capaz. Esto significa que el proceso cumple con las especificaciones, pero con un margen justo, por lo que se recomienda aplicar un control estricto para mantener la conformidad a largo plazo.

Coeficiente de Capacidad Real (comparar la capacidad del proceso y la amplitud de las tolerancias a satisfacer considerando su centrado):

$$Cpks = \frac{TS - \mu}{3\sigma} = \frac{32 - 22{,}8402}{3\ .\ 2{,}9488} = 1{,}03541466$$

$$Cpki = \frac{\mu - TI}{3\sigma} = \frac{22{,}8402 - 14}{3\ .\ 2{,}9488} = 0{,}99928739$$

*Tabla 4: Valores de Cpk y su interpretación*

| $C_p$ | % libre de defectos | Defectos | | Tamaño de la muestra esperada para encontrar un defecto |
|---|---|---|---|---|
| | | Porcentaje | PPM | |
| 0,66 | 95,45 | 5 | 45.500 | 22 |
| 1 | 99,73 | 0,26 | 2.699 | 370 |
| 1,33 | 99,994 | 0,006 | 60 | 15.780 |
| 1,63 | 99,9999 | 0,0001 | 1 | 1.741.523 |
| 2,0 | 99,9999998 | 0,0000002 | 0,002 | 504.988.339 |

$$Cpk\ \min = 0{,}99928739 < 1$$

Este valor evidencia que el proceso está ligeramente descentrado hacia el límite inferior de especificación (TI = 14 °C), lo que puede representar riesgo de generar productos fuera de tolerancia.

Si se asumiera una distribución normal, la variabilidad natural de este proceso con Seis Sigma produciría el 99.73% de la temperatura ambiente entre 13,9937°C y 31,6867°C. Sin embargo, dado que los datos no siguen una distribución normal, este rango podría no contener realmente el 99.73% de las observaciones, lo que implicaría un mayor número de fallas que el estimado bajo supuestos normales.

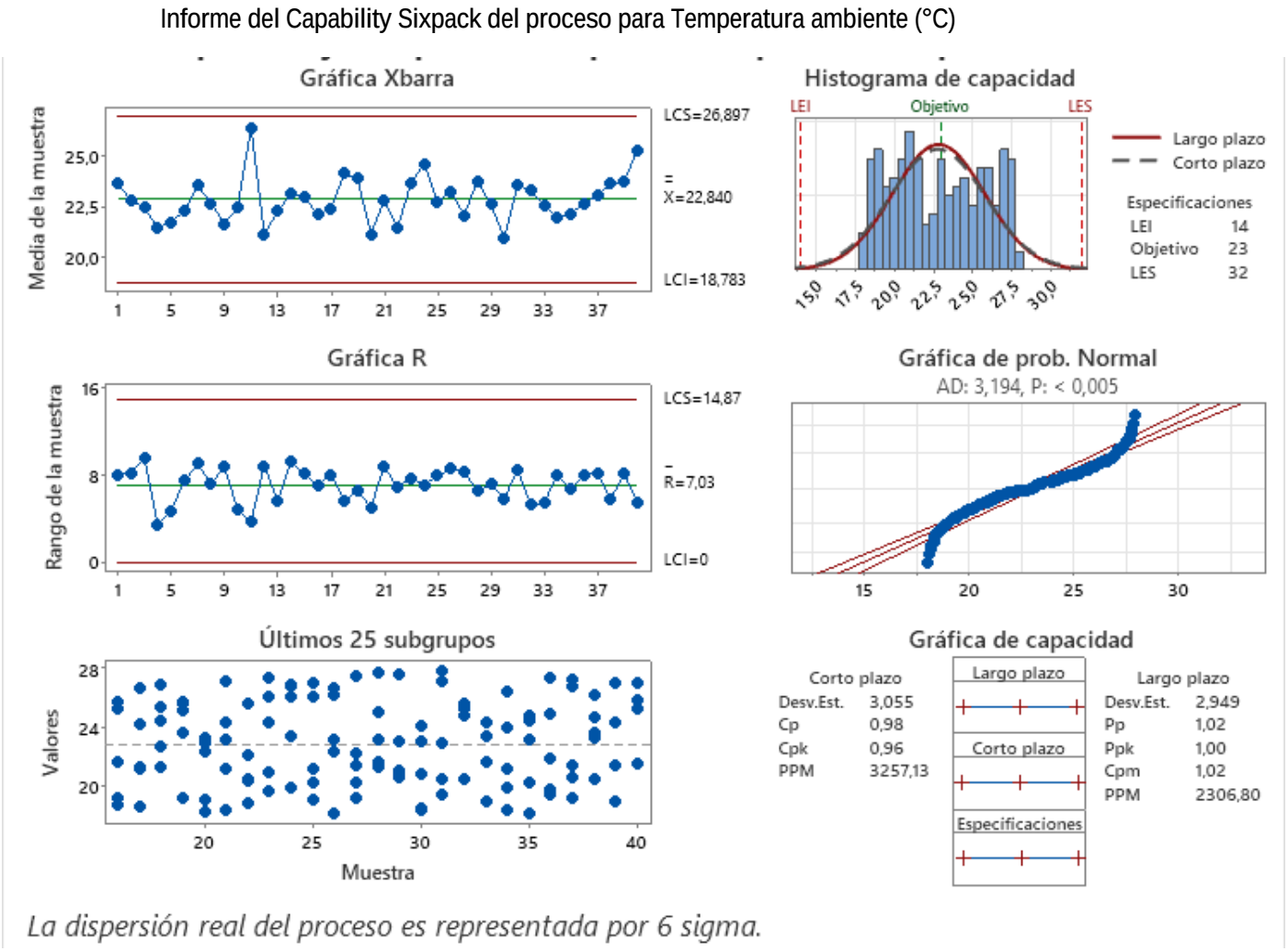



*Figura 6 : Informe del Capability Sixpack del proceso para Temperatura ambiente (°C)*

En síntesis: Actualmente, las variables medidas se encuentran dentro de las tolerancias establecidas, con un mínimo de 18.02 °C y un máximo de 27.87 °C.

Las gráficas de medias y rangos muestran que ningún valor excede los límites de control, por lo que el proceso se encuentra en control estadístico y es estable a lo largo del tiempo. Aunque el índice Cp es ligeramente superior a 1, el Cpk se encuentra por debajo del valor mínimo recomendado, lo que indica que el proceso es parcialmente capaz y está descentrado. Como consecuencia, el número estimado de piezas fuera de especificación (PPM) en el corto y largo plazo supera las 2,000 unidades por millón, lo que representa un riesgo significativo de producción fuera de la especificación de la temperatura ambiente. Además, dado que la distribución de los datos no es normal, estos cálculos podrían estar sujetos a errores que subestimen el riesgo real. En estas condiciones, no puede garantizarse la calidad del producto ni asegurarse que el proceso

produzca de manera consistente dentro de los rangos establecidos. Se recomienda implementar acciones correctivas, incluyendo el monitoreo continuo del proceso, la identificación de fuentes de variación y ajustes que reduzcan la variabilidad térmica, buscando además una mayor alineación con el valor objetivo de 23 °C. Es necesario aplicar medidas de recentrado y control más estricto, ya que el proceso muestra un leve desvío hacia el límite inferior de especificación y apenas alcanza los niveles mínimos aceptables. Aunque no se observan señales claras de causas especiales (el proceso está en control), la alta dispersión, la asimetría positiva y la no normalidad de la distribución podrían deberse en parte a causas comunes, propias del diseño y condiciones actuales del proceso. Corregir esta variación requeriría mejoras estructurales en técnicas, métodos, materiales o equipos. Pero, a su vez, estas mismas características podrían también estar indicando la existencia de causas especiales ocultas o intermitentes. Aunque la mayor parte de la variabilidad parece originarse en causas comunes, la presencia de asimetría, curtosis negativa y distribución no normal justifica profundizar el análisis. Para ello, debe reforzarse el monitoreo ambiental, la calibración de los equipos y la estandarización de los procedimientos de operación.

En resumen:

- El proceso está bajo control estadístico (estable).
- Es parcialmente capaz, con un Cp apenas superior a 1.
- Está levemente descentrado hacia valores más bajos.
- Aunque los valores actuales no indican un riesgo inmediato, se requiere un monitoreo continuo y posiblemente ajustes finos para mejorar el centrado y asegurar la conformidad del proceso frente a las especificaciones a largo plazo.

## 3. CONCLUSIONES.

Los resultados de la investigación demuestran una mejora sustancial en el dominio del control estadístico de procesos (CEP) por parte de los estudiantes. La evaluación en el dominio de la herramienta de CEP se realiza a través de una encuesta en la que se mide también, la adquisición de las competencias. Esto se manifiesta en una mayor habilidad para utilizar herramientas clave como los gráficos de control y para realizar análisis de capacidad. Además, se observó un desarrollo significativo en su capacidad de análisis y resolución de problemas, lo que indica que la metodología experimental empleada potencia el aprendizaje y la retención del conocimiento. Cabe destacar que, ya hace unos cuantos años, la FIUNLZ ha implementado un plan de estudios por competencias y que el desarrollo de herramientas como las que se muestran en el trabajo fomenta la adquisición de las mismas. Con respecto a las competencias se busca fortalecer las sociales y actitudinales detalladas en el Libro Rojo de CONFEDI (2018). En especial las relacionadas con la comunicación efectiva, el trabajo en equipo y el aprendizaje continuo. En conclusión, el estudio resalta la necesidad de incorporar estrategias didácticas innovadoras y experiencias prácticas en la formación de futuros ingenieros, preparándolos así para los desafíos del entorno industrial.

## 4. REFERENCIAS.

Carro Paz, R. y otro (2014). ADMINISTRACIÓN DE LAS OPERACIONES. Cap. 11 Control Estadístico de Procesos. Facultad de Ciencias Económicas y Sociales. Universidad Nacional de Mar del Plata.

Gutiérrez Pulido, H. y otro (2013). CONTROL ESTADÍSTICO DE LA CALIDAD Y SEIS SIGMA. 3ª ed. Cap. 10 Estado de un proceso: capacidad y estabilidad. McGraw Hill Education, México.

Lind, D. y otros (2012). ESTADÍSTICA APLICADA A LOS NEGOCIOS Y LA ECONOMÍA. 15ª ed. Cap. 19 Control estadístico del proceso y administración de la calidad. McGraw Hill Education, México.

Montgomery, D. y otro (2003). Probabilidad y Estadística Aplicada a la Ingeniería. 2ª ed. Cap. 15 Control estadístico de la calidad. Editorial LIMUSA, México.

Triola, M. (2018). ESTADÍSTICA (2018). 12ª ed. Cap. 14 Control estadístico del proceso. Pearson Education, México.

# EL SABER SER(SS) Y LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA) EN LA FORMACIÓN DE LOS INGENIEROS INDUSTRIALES

Mendizábal, Federico; Vaquer, Alejandro; Traverso, María Delia

ESIICA (Escuela Superior de Ingeniería, Informática y Ciencias Agroalimentarias
Universidad de Morón
mendizabalf@yahoo.com.ar

**RESUMEN**

La Inteligencia Artificial (IA) y el Saber Ser (SS) son dos temas importantes que se deben incluir en el proceso enseñanza/aprendizaje de todas las carreras de ingeniería.

Ambos tienen distinto origen e índole y parecen no interrelacionarse. El SS se basa en la filosofía y se refiere al comportamiento de las personas. La IA surge de las ciencias de la computación y se aplica en el desarrollo de la información y de la tecnología.

El objetivo de este trabajo es demostrar que la IA y el SS son complementarios y se necesitan mutuamente, especialmente por los miedos fundados que está generado el crecimiento exponencial y amplio de IA.

Por lo tanto, este trabajo: comienza mostrando el problema: los miedos que genera la IA en la sociedad. Luego muestra cómo se pueden diluir esos miedos mediante el trabajo conjunto de la IA y el SS.

Finalmente muestra como incorporar al SS en la formación de los ingenieros a fin de complementarse con la IA.

**Palabras claves**: Inteligencia artificial, el saber ser, su interrelación.

**ABSTRACT**

Artificial Intelligence (AI) and "to have the right attitude/demeanor" (SS) are two important topics that should be included in the teaching/learning process of all engineering programs.

Both have different origins and natures and appear to be unrelated. SS is based on philosophy and refers to human behavior. AI emerges from computer science and is applied in the development of information and technology.

The objective of this work is to demonstrate that AI and SS are complementary and mutually necessary, especially given the well-founded fears generated by the exponential and widespread growth of AI. Therefore, this work begins by showing the problem: the fears that AI generates in society. It then shows how these fears can be dispelled through the joint work of AI and SS.

Finally, it shows how SS can be incorporated into engineering training to complement AI.

**Keywords**: Artificial intelligence, self-reliance, their interrelationship

## 1. INTRODUCCION

### 1.1. Contextualización del problema

Uno de los problemas involucrados con la Inteligencia Artificial (IA) son los graves daños que se pueden generar si los datos que recopila, y/o la información que genera y/o su utilización no se realizan de modo adecuado.

### 1.2. El objetivo principal de este trabajo

El objetivo de este trabajo es mostrar en forma resumida porqué se debe incluir a la IA acompañada con la formación en el Saber Ser (SS) en las carreras de ingeniería industrial

### 1.3. Justificación del problema

La actividad del ingeniero industrial incluye procesar información en forma amplia y rápida e interactuar de modo directo e indirecto con personas y para ello, es notoria la trascendencia presente y futura que tiene la IA.

Sin embargo, el desarrollo, implementación y utilización de la IA debe desarrollarse con principios éticos y por el bien de la sociedad y el medio ambiente.
.
Por lo tanto, dada la importancia de ambos, consideramos que se debe incorporar a la IA junto con el SS en las carreras de Ingeniería Industrial.

Además, el CONFEDI (Consejo Federal de Decanos de Ingeniería) establece que la formación de los ingenieros debe ser por competencias, y esto implica incorporar al Saber Conocer, al Saber Hacer y al SS en las carreras de ingeniería (Libro Rojo del CONFEDI pag.22).

Sin embargo, el SS y la IA, parecen temas de distinto origen e índole y poco relacionados entre. El SS se basa en la filosofía y se refiere al comportamiento de las personas. La IA surge de la ciencia de la computación y se aplica en el desarrollo de la información y la tecnología.

### 1.4. La metodología empleada

La metodología empleada en este trabajo se enmarca en la clasificación cualitativa, dado que implica describir y comprender las implicancias de un fenómeno tecnológico (la IA) con la sociedad.

Dado que la extensión de este trabajo está limitada a un máximo de 12 páginas, su foco y desarrollo se han estructurado en función de los temores que la IA suscita en la sociedad."

## 2. EL PROBLEMA PLANTEADO

La IA está generando miedos en sociedad y el ingeniero industrial no debe desentenderse de ellos:

### 2.1. La irrupción productos/servicios de avanzada

A la IA, como a todo producto nuevo, le afecta un factor muy tenido en cuenta en Marketing y en Diseño Industrial: el efecto M.A.Y.A. (Most advanced yet aceptable o “el más novedoso aun aceptable”). Este concepto fue acuñado originalmente por el famoso diseñador industrial francoestadounidense Raymond Loewy (Interaction Design Foundation - IxDF - 2016)

El efecto M.A.Y.A. postula que las personas tienden a preferir productos o innovaciones vanguardistas (Most Advanced), pero que al mismo tiempo les resulten familiares y comprensibles (Yet Acceptable). En el campo de la Inteligencia Artificial (IA), este principio se aplica a:

- El diseño de la interacción: una IA debe ser lo suficientemente avanzada como para ofrecer una funcionalidad superior, pero su interfaz, su lenguaje y la forma en que interactúa con las personas

deben ser lo suficientemente familiares o naturales para que el usuario la adopte sin sentirse abrumado o intimidado. Por ejemplo, los chatbots avanzados imitan la conversación humana (aceptable) para ofrecer una solución tecnológica compleja (avanzada).

- Aceptación Social: la introducción de nuevas tecnologías como la IA, debe gestionarse en forma adecuada para ser aceptada. Una solución será rechazada si es demasiado radical y/o desestabiliza demasiado rápido a las costumbres y/o al mercado laboral.

Por lo tanto, la idea central referida al efecto M.A.Y.A es encontrar el punto óptimo entre la innovación pura y la comodidad del usuario para lograr una adopción masiva.

### 2.2. El miedo adicional que genera la AI

La humanidad realizó desarrollos tecnológicos significativos a través de los años (la imprenta, el automóvil, la energía nuclear, los vehículos espaciales tripulados, etc.), los cuales se fueron desarrollando durante décadas y sus efectos sobre la mayoría de las personas fue lento. Pero con la IA acontece algo inédito:

- Nunca una tecnología creció, se diseminó e involucró a tanta gente en tan breve lapso (y sigue creciendo de modo exponencial).

- La IA generó una nueva era, en la que el poderío tecnológico pone a la humanidad en encrucijadas, donde los futuros son inciertos, importantes e inmediatos, y entre ellos está el desempleo.

- La sociedad teme que la IA (y la robótica que alimenta) sea la nueva fuente de poder mundial, y capaz de invadir países de modo físico y/o a través de lo ideológico/cultural.

El Papa Francisco advirtió: “Hay que reconocer que los objetos producto de la técnica no son neutros, pues crean un entramado que termina condicionando estilos de vida y orientan las posibilidades sociales en la línea de los intereses de determinados grupos de poder. Ciertas elecciones que parecen puramente instrumentales, en realidad son elecciones acerca de la vida social que se quiere desarrollar.” Francisco (2015, p.84)

Según una encuesta a nivel mundial realizada entre el 19 de abril y el 3 de mayo de 2024 en 32 países a nivel mundial, el nerviosismo que genera la IA es de un 50 % (Ipsos AI Monitor, 2024).

La IA acede a fuentes de datos y con los datos extraídos genera información, su confiablidad depende de: las fuentes (la cantidad y certeza de sus datos), los algoritmos/modelos que utiliza y de la utilización de la información que brinda.

Por ejemplo, el 20/08/2025 al preguntar a la IA por un autor de este trabajo, GEMINI recurre a Google y brinda información parcial y desactualizada y Meta AI directamente desconoce a esa persona.

### 2.3. La confesión de los principales impulsores de la IA

Nos referimos a la carta abierta titulada "Pause Giant AI Experiments: An Open Letter" (Pausar los Experimentos Gigantes de IA) del 22/03/2023 del Future of Life Institute (FLI), firmada por Elon Musk (cofundador de OpenAI), Steve Wozniak (cofundador de Apple), Yuval Noah Harari (historiador y autor), Yoshua Bengio (considerado uno de los "pioneros" de la IA moderna), etc.

Esta carta pedía a todos los laboratorios de IA la inmediata suspensión (por 6 meses como mínimo), del entrenamiento de sistemas de IA más potentes que GPT-4, por considerar que el desarrollo de esta tecnología estaba en una "carrera fuera de control” y se podrían plantear "profundos riesgos para la sociedad y la humanidad" ". También instaba a “la intervención de los gobiernos si no se podía llevar a cabo esa pausa voluntaria”.

Si los desarrolladores de la IA mostraban ese miedo, es lógico pensar que esa carta abierta multiplicó aún más los miedos del resto de la humanidad, pues “a confesión de partes relevo de pruebas”.

### 2.4. Los vacíos legales

La “Ley sobre IA (Unión Europea)” es la primera y la más integral sobre la IA en el mundo y recién se promulgó en el año 2024. Dicha ley clasifica la autorización utilizar la IA) en tres categorías, en función del riesgo que podrían ocasionar:

- Las de riesgo inaceptable: Éstas están prohibidas. (P. ej. los sistemas de puntuación social operados por gobiernos, caso China).

- Las de riesgo alto: Éstas están sujetas a requisitos legales específicos. (P. ej. las herramientas de escaneo de CV que clasifican a los solicitantes de empleo).

- Las no prohibidas explícitamente. Este grupo involucra a la mayoría de las AI. Al no estar reguladas, no están prohibidas. Pero además, es posible que muchas de ellas sean recalificadas como riesgo alto luego de extensos y lentos consensos (más aún si hay intereses en juego de corporaciones y/o de países).

En cambio, las leyes regulatorias de la IA en USA, son más laxas y/o deficientes que las europeas (The Ecónomist, 2025). Además, en USA está muy difundido el criterio que las regulaciones frenan la creatividad, incrementan los costos y, por ende, atentan contra el desarrollo tecnológico y la competitividad del país.

### 2.5. Manejar a la IA o ser manejados por la IA

**L**os celulares mejoraron la conectividad y las comunicaciones interpersonales, pero también incrementaron la ansiedad y la falta de concentración y a muchas personas le genera una dependencia similar a una adicción. Por lo tanto, se teme que la IA cause efectos aún peores que los celulares.

### 2.6. La pérdida de empleos y de habilidades

En los ámbitos laborales de occidente existe el miedo generalizado que la automatización reemplace a las personas en tareas repetitivas, obligando a desemplear a miles de persona y, en el mejor de los casos, reubicar y capacitar a los trabajadores desplazados en actividades de menor nivel y/o remuneración.

Además, si la IA se vuelve imprescindible, se teme que la sociedad pierda habilidades humanas esenciales tales como el pensamiento crítico, la creatividad y las relaciones interpersonales.

### 2.7. Conductas no éticas

Los sistemas de IA se nutren y aprenden de datos y con ellos pueden amplificar prejuicios y generar discriminación en diferentes ámbitos (la justicia, las contrataciones, la información, etc.).

La capacidad de la IA para manejar datos personales incrementa el miedo a la vigilancia masiva y a la manipulación e incluso, a que sin proponérselo ayude a los delincuentes.

Por ejemplo, la aplicación Waze es muy útil, pero puede inquietar sobre la privacidad de los desplazamientos de las personas y permite alertar a los delincuentes dónde se localizan los controles policiales.

Un pequeño grupo de empresas tecnológicas controla el desarrollo de la IA. Eso genera el temor que ellas impongan su tecnología sin considerar el bienestar de las personas.

Existe miedo a que sea la propia IA quien tome el control de los objetivos y el desarrollo, y deje de lado a los seres humanos y/o atente contra ellos.

El comunicarse con la IA, en vez de con personas, puede inducir a la pérdida de capacidades humanas tales como la empatía, la solidaridad, el comunicarse afectivamente, el vivir en comunidad, etc.

La emergencia y rápida diseminación global del COVID-19 generaron una profunda incertidumbre existencial que, en diversos sectores de la población y análisis sociales, se manifestó como la aprehensión de un colapso civilizatorio.

Pero a diferencia de esa pandemia, no se percibe un interés generalizado en encausar a la IA por parte de los gobiernos. Se espera que las IA se desarrollen con criterios éticos, pero la incógnita está en cómo establecerlos y cómo implementarlos.

## 3. DESARROLLO

Este ítem comienza definiendo al SS y a la IA, continúa indicando cuál es el estado del arte sobre la interrelación entre el SS y la IA, finalmente analiza si la SS puede disminuir el miedo que generan la IA en la sociedad.

### 3.1. A qué se denomina SS

La UNESCO (1996) establece que el Saber Ser (SS) constituye un concepto medular en el ámbito de la pedagogía y en el enfoque de la educación basada en competencias. Este concepto alude a la dimensión personal, ética y social del aprendizaje, y se enfoca en el desarrollo integral del individuo, e incluye, entre otros, a estos elementos:

- Actitudes: Se refiere a las disposiciones internas para actuar de cierta manera (optimismo, flexibilidad, mentalidad abierta, etc.).
- Valores: Se refiere a los principios éticos y morales (responsabilidad, respeto, honestidad).
- Creencias: Marcos de referencia personales.
- Aspectos de la personalidad: Se refiere a los rasgos individuales (seguridad en sí mismo, introversión/extroversión).

En esencia, el SS se relaciona con aprender a vivir y convivir. Ello implica que la persona tenga la capacidad de reflexionar y actuar de modo coherente con un sistema de valores, y de ese modo, desenvolverse de manera adecuada en los contextos sociales y profesionales.

### 3.2. En qué consiste el SS referido a la Ingeniería Industrial

Es habitual incluir al SS dentro de la literatura sobre Competencias, junto con el Saber (conocimiento) y el Saber Hacer (habilidades o destrezas). Esto se justifica en la necesidad intrínseca que la formación del ingeniero industrial contemple la adquisición de aptitudes y de actitudes relativas a la dimensión intrapersonal y la interpersonal del profesional.

En última instancia. el objetivo del SS es ser feliz. Al respecto, Aristóteles señala en su obra cumbre sobre ética, (Ética a Nicómaco), que la aspiración suprema y el fin último del ser humano es la felicidad y argumenta que todas las acciones humanas tienden a un bien, y que el bien supremo es aquel que se desea por sí mismo y no en función de otra cosa- Él denomina “eudaimonía”, a este bien supremo, traducido como "felicidad", "vida buena" o "florecimiento humano”. (Aristóteles, c. 330 a. C./2000).

Pero es importante no confundir la felicidad con momentos alegres. Éstas son emociones placenteras, pero transitorias y muchas veces disparadas por agentes externos. En cambio, la felicidad:

- Es permanente y está relacionada con el sentido y expectativas que se le da a la propia vida y debe estar orientada al bien de los demás.
- No depende de lo que le acontece a uno, sino de qué hace uno con lo que le acontece.
- No depende de lo que tiene sino qué hace con lo que tiene.
- Se sustenta en el amar al prójimo como a uno mismo.

Estos conceptos sobre la felicidad no son sólo meras disquisiciones filosóficas. También están incluidos en las actitudes que debe tener el ingeniero en su ejercicio profesional, dado que:

- Sus desarrollos e implementaciones deben estar orientadas al su propio bien y el de los demás.
- Su éxito profesional no dependerá de qué le acontezca ni de los recursos con que cuente, sino de lo que haga con lo que le acontece y con los recursos disponibles.

- Su conducta no debe limitarse a cumplir con los códigos de ética (o sea qué cosas no se deben hacer) sino también debe incluir la empatía, el sentido crítico y la creatividad.

- Su actitud debe ser positiva y proactiva, no solo respecto a los objetos y al medio ambiente, sino también respecto a las personas. Y esto implica que ame a su prójimo como a sí mismo dado que si no se ama, se auto destruye y afecta al prójimo y si no ama al prójimo, entra en conflicto con los demás y también se perjudica el mismo y perjudica a los demás.

### 3.3. Qué es la IA

El nombre de IA surge porque es una aplicación que se enfoca en crear sistemas y/o máquinas capaces de imitar capacidades cognitivas que hasta hace poco eran exclusivas de la inteligencia humana, como ser la recopilación de datos para generar información, y con ellos desarrollar la percepción, el aprendizaje, el razonamiento y la resolución de problemas.

En la práctica, la IA consiste en desarrollar algoritmos y modelos matemáticos que, a través del análisis de grandes volúmenes de datos, pueden identificar patrones, tomar decisiones y realizar tareas de manera autónoma, sin una programación explícita para cada posible escenario.

La IA está conformada por un conjunto de disciplinas de la informática que trabajan en conjunto para automatizar tareas, analizar datos de forma masiva, predecir resultados. Las principales son:

- Aprendizaje Automático (Machine Learning**):** Consiste en dotar a las máquinas de la capacidad de aprender a partir de datos, sin ser programadas directamente para cada tarea. Se entrenan con información para que identifiquen patrones, hagan predicciones o clasifiquen datos.
- Aprendizaje Profundo (Deep Learning): Es un subcampo del machine learning. Utiliza redes neuronales artificiales multicapas (estructuras inspiradas en el cerebro humano), las cuales permiten a la IA procesar información de forma más compleja. Es ideal para tareas avanzadas p. ej. reconocer imágenes, procesar el lenguaje natural, la visión por computadora, etc.
- Procesamiento del Lenguaje Natural (PNL**):** Permite a las máquinas entender, interpretar y generar lenguaje humano. Es la tecnología detrás de asistentes de voz, chatbots y herramientas de traducción automática.
- Visión por Computadora (Computer Vision): Les da a las máquinas la capacidad de "ver" e interpretar imágenes y videos. Se utiliza en sistemas de reconocimiento (facial, botánico, etc.) y se aplica en vehículos autónomos, en la medicina, la industria, finanzas, entretenimientos, etc.

### 3.4. El estado del arte sobre la interrelación entre el SS y la IA

John Mc Carty acuñó el término IA, en 1956, pero recién el 30/1/2022, OpenAI lanzó públicamente ChatGPT y en cinco días superó el millón de usuarios. (Rabossi, Marcelo, 2025).

Por lo tanto, todo lo publicado sobre la interrelación entre la AI y el SS ha sido muy reciente, se va actualizando constantemente y la mayoría de esas publicaciones se centran en:

- El dilema entre formar conciencias o automatizar saberes (Rabossi, Marcelo, 2025).

- Percibir ausencia de empatía y de emoción real en la IA: todavía no reemplaza a las conversaciones sensibles y amorosas que se hacen mirando a los ojos.

- Considerar que depender de la IA para tareas complejas de pensamiento pueda limitar y/o atrofiar el desarrollo de habilidades humanas fundamentales, como el pensamiento crítico, el juicio humano y el conocimiento tácito (el que se adquiere a través de la práctica y la experiencia).

- Los límites éticos de la IA y la necesidad de un marco legislativo internacional) que subordine su desarrollo a la dignificación de la vida biológica y aborde problemas como los sesgos, la equidad y la desinformación (UNESCO, 2022).

- Hay que considerar que los humanos y las máquinas son buenos en diferentes tareas. Los humanos aportan el juicio, la creatividad, la emoción y la ética. La tecnología las materializa. Por lo tanto, el SS y la IA son complementarias (Krylova S. et al., 2024).

### 3.5. La IA ¿es buena o es mala para la humanidad?

La Inteligencia Artificial (IA), al igual que cualquier innovación tecnológica, se concibe fundamentalmente como una herramienta inherentemente neutral. Su valor ético y su impacto en la sociedad no residen en la tecnología en sí misma, sino que emergen de las intenciones y las aplicaciones que le confieren los actores humanos y las estructuras sociales.

Este principio de neutralidad se ilustra claramente con el ejemplo de la energía atómica: mientras que su aplicación en armamento (como el caso de Hiroshima) demostró un potencial destructivo catastrófico, el mismo conocimiento y desarrollo tecnológico posibilita beneficios críticos en el ámbito civil, tales como la generación de electricidad para iluminar ciudades y su uso terapéutico avanzado en la medicina nuclear.

En consecuencia, el debate ético y la responsabilidad recaen en la gobernanza humana de la IA, demandando marcos regulatorios robustos y una reflexión profunda sobre sus aplicaciones para maximizar el bienestar colectivo y mitigar los riesgos inherentes al mal uso o al desarrollo sin control.

Dada la alta probabilidad que los ingenieros industriales interactúen con la IA, es fundamental formarlos en el SS. Esta afirmación se puede demostrar aplicando la reducción al absurdo: ¿qué pasaría si los ingenieros que desarrollan y/o implementan la IA careciesen por completo de principios éticos?

Lo antedicho se puede corroborar con los siguientes ejemplos:

### 3.5.1. ¿Puede la IA decidir la muerte de personas?

La respuesta surge a través de estos dos casos posibles:

- Un automóvil autónomo está ante una colisión inminente con otro automóvil, la que indefectiblemente que causará la muerte de todos los pasajeros de uno de esos dos vehículos. Quien decide quiénes mueren no es la IA de ese vehículo, sino quien programó esa IA.

- Si la IA NN genera otra IA (la IA ZZ) y ésta causa la muerte de personas, el culpable no es ninguna de esas IA, sino quien programó los algoritmos de la IA NN que permitieron que la IA ZZ ocasionase la muerte de personas.

### 3.5.2. ¿La IA genera desempleo?

La IA no genera desocupados. Quien los genera es quien decide despedir a los empleados desplazados.

Desde los años 60, las empresas en Japón no despiden al personal que resulta desplazado a causa de incorporar una nueva tecnología. Los reubican en la empresa, y si no hay puestos suficientes, los crean. Por eso la empresa Mitsubishi fabrica automóviles, televisores, barcos, ascensores, productos químicos, etc. y también es dueña de bancos y compañía de seguros.

Este criterio humanista también es positivo desde el punto de vista económico: Japón está entre los 5 países con mayor PBI, (Top 10 largest economies in the world, 2025), entre los 5 países con mayor de robots/habitante (International Federation of Robotics, 2024 y. World Robotics 2024), entre los 5 países con menor índice de desempleo (UNIDO 2023) y entre los 5 países industrializados con prácticas más éticas (Transparency International 2025).

### 3.5.3. ¿Afecta la IA y el poder adquisitivo de los habitantes?

Si los robots remplazasen a los humanos y estos quedasen desocupados y/o derivados a tareas menos remuneradas, no habría ingresos suficientes para adquirir los productos actuales.

Pero, en última instancia, lo que importa no son los ingresos que perciben las personas, sino que ellos cuenten con el poder adquisitivo suficiente para obtener los productos/servicios que realmente necesitan. Al respecto vemos que el progreso tecnológico disminuye los costos. Por ejemplo, en Argentina:

- El precio al público de una calculadora electrónica de 4 operaciones era u$s 50 en 1971 y hoy el precio de una calculadora que realiza muchas más operaciones es de u$s 3

- En 1990 ver una película en el hogar implicaba ir a un video club, pagar el alquiler del video, ir al hogar, verla y finalmente ir a devolverla. Hoy), se puede ver gratis películas en YouTube, (o a muy bajo precio mediante Prime, Netflix, etc.) y a cualquier hora y sin salir del hogar.

- Hay IA agrícolas que indican el momento más adecuado para sembrar, regar, fumigar, controlar, cosechar, etc., y así reducir costos y así poder ofrecer más productos y a menor precio.

Además, el SS implica "tomar conciencia que la felicidad requiere saber limitar algunas necesidades que nos atontan, quedando así disponibles para las múltiples posibilidades que da la vida" (Francisco 2018, pág. 169). Esto implica dejar comprar productos/servicios que en el fondo no lo satisfacen y/o lo perjudican (física y/o psíquicamente) y consumir otros productos/servicios que son mejores y de menor costo. Un ejemplo de esto sería dejar las adicciones, tanto licitas como ilícitas.

### 3.6. La interrelación entre la IA y el SS

En el ítem 1 vimos que el CONFEDI exige incluir al SS en la formación de los ingenieros para que desarrollen y utilicen la tecnología a favor de la sociedad.

En el ítem 2 vimos que un 50 % de la sociedad percibe que la IA automatiza tareas técnicas y analíticas, pero teme que la IA pueda generar problemas serios a sus vidas.

Esto implica que en la sociedad se percibe:

- Las infinitas posibilidades y los beneficios que puede aportar la IA: minimizar el tiempo para predecir fallas, optimizar procesos, mejorar la eficiencia en el uso de recursos, diseñar sistemas resilientes y sostenibles, evaluar múltiples opciones, etc.

- Los daños que se pueden ocasionar mediante la IA.

Por lo tanto, se requiere que quienes generan le implementen las IA, tengan conductas éticas, por lo que la clave estaría incluir el SS en el desarrollo y la implementación de la IA.

### 3.6. ¿Es complicado incorporar al SS en la carrera de ingeniería industrial?

El SS es la actitud que deberán tener siempre los futuros ingenieros. El SS también es importante durante la carrera. Por ejemplo, no se pueden aceptar que los alumnos comentan faltas de ética en los exámenes.

Por lo tanto, el proceso de enseñanza/aprendizaje del SS, no debe limitarse al contenido de una asignatura, sino que debe incluirse en todas las clases de todas las asignaturas y de modo práctico.

La implementación del SS no es complicada para los docentes dado que:

- No requiere modificar los planes de estudio ni el contenido de las asignaturas. Solo requieren incorporar estrategias didácticas durante el dictado de estas.

- Justamente en las IA (GEMINI y Chat GPT, etc.) se puede obtener la información de cómo incorporar las estrategias didácticas referidas al SS en todas las clases de todas las asignaturas de ingeniería industrial, (hasta incluso en asignaturas no humanista como Análisis Matemático).

### 3.7. Los aportes adicionales que brinda del SS

Además de los aportes del SS a la IA ya mencionados, el SS brinda los siguientes aportes a las carreras de ingeniería industrial que son útiles para los egresados y también son válidos para los estudiantes.

#### 3.7.1. Comprensión de los problemas

En un futuro cercano, la mayoría de los proyectos de ingeniería serán complejos y estarán relacionados (en forma directa y/o indirecta) con la IA y con las personas. Ello requiere que los ingenieros industriales desarrollen una excelente comunicación interpersonal y esto implica aplicar el SS (actitud positiva, empatía, saber escuchar, ética, etc.).

### 3.7.2. Estabilidad emocional

Los desequilibrios emocionales (odio, rencor, deseo de venganza, etc.), nublan la mente y, por lo tanto, disminuyen la posibilidad de desarrollar procesos realmente creativos. Esto se evita aplicando el SS.

### 3.7.3. Resolución de problemas

La sociedad requiere que los ingenieros industriales resuelvan problemas (muchos de ellos relacionados en forma directa y/o indirecta con personas), y eso requiere que quienes los resuelvan tengan las actitudes que incluye el SS (sentido crítico, creatividad, responsabilidad, ser confiable, etc.).

### 3.7.4. Tomar decisiones éticas

A medida que se desarrollan y se usan sistemas de IA que afectan a la sociedad (vehículos autónomos, algoritmos de contratación, etc.) se requiere un fuerte marco ético para asegurar que estas tecnologías resulten justas, seguras y equitativas. Como la IA carece de conciencia moral, es el ingeniero quien, como desarrollador y/o implementador y/o usuario, debe ser el guardián de la ética.

Por lo tanto, el proceso enseñanza/aprendizaje de la ética no debe limitarse a repetir conceptos escritos en códigos de ética, sino fundamentalmente, en aplicarlos.

El objetivo de todo curso debe ser aprender y aprobar. Sería injusto aprender sin aprobar y aprobar sin aprender. El docente debe constatar que el resultado de las evaluaciones (parciales, trabajos prácticos y finales) reflejan el esfuerzo y el pensamiento crítico del estudiante y no el fruto de una copia.

### 3.7.5. Desarrollar el pensamiento crítico y creativo en el estudiante

Uno de los elementos que integran el SS es el pensamiento crítico y la creatividad, para lo cual, el estudiante:

- No debe limitarse a memorizar libros y/o apuntes. Debe tener sentido crítico, preguntarse el porqué de las cosas, investigar y formar sus propias conclusiones sobre los temas.

- Debe organizarse para estudiar en forma regular, gestionar su tiempo y cumplir con sus tareas sin necesidad de ser supervisado.

- Si no aprueba un examen, no debe rendirse, sino analizar sus errores, pedir ayuda al docente y esforzarse más para la siguiente evaluación.

La IA puede procesar y analizar grandes cantidades de datos. Pero si las fuentes a las que acude no son adecuadas en calidad y/o cantidad, la capacidad de la IA para responder a preguntas originales y/o dar respuestas no convencionales y/o resolver problemas complejos, será inferior a las humanas.

En la actualidad la IA puede orientar en muchos temas y brindar información, pero (hasta el presente) lo que aporta sobre un tema no es concluyente ni determinante. Por eso, la IA no debe considerarse un “piloto” que lleva al estudiante o al graduado, sino un “copiloto” que le aporta información, que el estudiante debe verificar su exactitud y/o sesgo con fuentes confiables (libros, revistas arbitradas, etc.).

### 3.7.6. La convivencia y el trabajo colaborativo.

Cabe resaltar que la ética y la solidaridad son fundamentales.

La integración efectiva en el entorno académico exige que los estudiantes incorporen activamente en sus dinámicas y tareas a compañeros provenientes de diversas culturas y géneros.

Este proceso debe estar fundamentado en el interés genuino por comprender y aprender sobre las prácticas y costumbres de los demás, estableciendo la base para una interacción respetuosa.

Por lo tanto, se deben generar proyectos entre estudiantes donde se dividan equitativamente las tareas, se escuchen mutuamente con empatía y resuelvan de modo cooperativo los problemas que surjan, a finde de lograr un objetivo común.

Se recomienda utilizar la IA como recurso compartido en tareas, tales como organizar, cronogramas, sugerir diferentes enfoques, articular conceptos técnicos complejos de forma más clara, simular diferentes escenarios para entender cómo un diseño podría afectar a los usuarios de diferentes culturas con espíritu inclusivo (aplicando empatía), etc.

### 3.7.6. Colaborar en la investigación.

En el desarrollo de las investigaciones, la IA permite:

- Encontrar bibliografía en forma rápida.
- Procesar grandes cantidades de datos, limpiarlos, encontrar patrones.
- Generar modelos predictivos, desarrollar proyectos, etc.

Estos beneficios permiten al investigador dedicar más tiempo y concentración a las tareas relacionadas con el análisis, la síntesis, la interpretación de los resultados y la elaboración de conclusiones significativas, pero por supuesto, sin dejar de lado al SS.

## 4. CONCLUSION

La tecnología ha remediado innumerables males que limitaban al ser humano. Por lo tanto, es justo alegrarse por los avances tecnológicos y reconocer todos los esfuerzos de los muchos científicos y técnicos que aportaron alternativas para el desarrollo sostenible (Francisco, pág. 80).

La IA es una tecnología que crece y se ramifica en forma exponencial y sus alcances son insospechados. Por lo tanto, los beneficios que aporta a la sociedad se incrementan de igual modo.

Sin embargo, a medida que se expande la IA también se incrementan los miedos a los graves daños que puede causar si los datos que recopila, y/o la información que genera y/o su utilización no se realizan de modo adecuado y peor aún si están reñidos con la ética.

Dado que la mayoría de las leyes y reglamentaciones que deben controlar los desarrollos de las IA posteriormente a la implementación de esas IA, surgen vacíos legales que crecen en forma exponencial.

Dado que está permitido lo no prohibido, la sociedad depende cada vez más del sentido ético de quienes desarrollan, implementan y utilizan las distintas aplicaciones que ofrece la IA.

Ante este escenario y observando el mundo actual, no podemos confiar y dejar todo librado a la aparición de verdaderos estadistas para controlar a la tecnología.

Además, como la raíz del problema es humana, la posibilidad que se abre para reencausar a la IA, está en el ámbito educativo y cultural. (Zamora 2017, pág. 11).

Dado que los ingenieros industriales van a estar cada vez más involucrados con la IA y ante la necesidad de garantizar que la IA beneficie a la sociedad de manera responsable y justa (y por ende disminuyan los miedos que tiene la sociedad referidos a ella), es necesario incorporar al SS en las carreras de ingeniería industrial.

Además el SS incrementa y facilita y fortalece la formación de los ingenieros en el mundo actual dado que también incluye formar en el sentido crítico, la creatividad y el desarrollo actitudinal respecto a si mismo y a los demás.

Dado que el SS tiene un alto componente actitudinal, su el proceso de enseñanza/aprendizaje no debe limitarse al contenido de una asignatura, sino que debe incluirse en todas las clases de todas las asignaturas y de modo práctico.

Incorporar el SS en las carreras de ingeniería industrial resulta novedoso y disruptivo, pero es de fácil implementación.

Desde el punto de vista formal/institucional: no hay inconvenientes, dado que el ordenamiento de las carreras de ingeniería está reglamentado en la Resolución 1232/01 de Ley Nacional de Educación, y ella señala que las materias del ciclo “complementario” de las carreras de ingeniería tienen como fin “formar ingenieros conscientes de las responsabilidades sociales y capaces de relacionar diversos factores en el proceso de tomas de decisiones” (Zamora, pág. 12).

Desde el punto de vista académico: no resulta complicado implementar el SS en la carrera de ingeniería industrial, dado que:

- No se requiere modificar los planes de estudio ni el contenido de las asignaturas. Solo necesita incorporar estrategias didácticas durante el dictado de estas.

- Justamente en las IA (GEMINI y Chat GPT, etc.) se puede obtener la información de cómo incorporar las estrategias didácticas referidas al SS en todas las clases de todas las asignaturas de ingeniería industrial, (incluso asignaturas no humanistas como es el Análisis Matemático).

## 5. BIBLIOGRAFÍA


Akao, Y., & Mazur, G. H. (2003). The leading edge in QFD: Past, present and future. International Journal of Quality & Reliability Management, 20(1), 20–35. https://doi.org/10.1108/02656710310453791

Aristóteles. (2000). Ética a Nicómaco (J. Pallí Bonet, Trad.; 4.ª ed.). Editorial Gredos. (Obra original publicada c. 330 a. C.).

CONFEDI, (2018) PROPUESTA DE ESTÁNDARES DE SEGUNDA GENERACIÓN PARA LA ACREDITACIÓN DE CARRERAS DE INGENIERÍA EN LA REPÚBLICA ARGENTINA “LIBRO ROJO DE CONFEDI” https://confedi.org.ar/download/documentos_confedi/LIBRO-ROJO-DE-CONFEDI-Estandares-de-Segunda-Generacion-para-Ingenieria-2018-VFPublicada.pdf

Forbes India. (2025, julio 21). Top 10 largest economies in the world 2025 (GDP rankings & key in sights). Forbes India. (Basad o en datos del IMF).

Francisco (2015) Carta encíclica Laudato si: Sobre el cuidado de la casa común.- C.A.B.A -. Conferencia Episcopal Argentina.

Índice de percepción de la Corrupción (CPI) – Transparency International- febrero 2025 (2025)

Interaction Design Foundation - IxDF. (2016, 31 de agosto). What is The MAYA Principle? Interaction Design Foundation - IxDF. https://www.interaction-design.org/literature/topics/maya-principle

International Federation of Robotics. (2024). World Robotics (2024):

IpsosAI Monitor (2024) empresa global de investigación de mercado publicada en su plataforma https://www.ipsos.com/es-ar/ipsos-ai-monitor-2024#:~:text=Emociones%20

Krylova, S., Krylova, V., Manoyl, N., Gerasymov, E., & Table, T. (2024). Relaciones de saber y poder entre la inteligencia artificial y la condición humana: reflexiones desde la filosofía social contemporánea. Interacción y perspectiva revista de trabajo social, 14(2), 360 -370. https://doi.org/10.5281/zenodo.10909683

Rabossi, Marcelo (2025) Diario La Nación (Argentina) del 17/10/2025 página. 31

Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (UNIDO) 2023

The Economist (2025) Diario La Nación (Argentina) el 12/04/2025 paginas. 2 y 3 sección comunidad.

UNESCO. (1996). La educación encierra un tesoro: Informe a la UNESCO de la Comisión Internacional sobre la Educación para el Siglo XXI (J. Delors, Pres.). Ediciones UNESCO.

UNESCO. (2022). Recomendación sobre la Ética de la Inteligencia Artificial. París: UNESCO. Recuperado de https://www.unesco.org/es/legal-affairs/recommendation-ethics-artificial-intelligence UNESCO+2UNE

Unión Europea (2024) https://artificialintelligenceact.eu/es

Visual Capitalis (datos marzo 2025, países de la OCDE)

Zamora, María Clara. (2017) La enseñanza de la ingeniería y la educación tecnológica. Educa páginas 11 y 12

# METODOLOGÍAS DE ENSEÑANZA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL- PRIMEROS ABORDAJES

Martínez-Sánchez, Paloma María Teresa; Urrego Ayala Tannia Sofía

*Ingeniería Industrial, Universidad Militar Nueva Granada*
*paloma.martinez@unimilitar.edu.co; est.tannia.urrego@unimilitar.edu.co;*

**RESUMEN**

Este artículo presenta un primer abordaje a las metodologías de enseñanza empleadas en un programa de Ingeniería industrial, en una universidad colombiana, para lo cual lo primero que se realizó fue una búsqueda bibliográfica de las metodologías de enseñanza-aprendizaje incluidos el aprendizaje basado en proyectos (ABP), gamificación, aprendizaje experiencial, aprendizaje autónomo, cooperativo y basado en problemas. Posteriormente, se aplicó un primer estudio piloto mediante encuestas a estudiantes de sexto y octavo semestre, con el fin de establecer cuáles eran las metodologías empleadas principalmente por sus docentes. Los resultados evidencian que son valoradas las actividades prácticas e interactivas que conectan teoría con aplicaciones reales, destacando beneficios como el desarrollo de competencias técnicas, habilidades blandas y una mejor preparación para desafíos laborales.

**Palabras Claves:** Metodologías, Enseñanza, Ingeniería Industrial

ABSTRACT

This article presents a preliminary approach to the teaching methodologies used in an Industrial Engineering program at a Colombian university. The first step was a bibliographic search of teaching and learning methodologies, including project-based learning (PBL), gamification, experiential learning, autonomous learning, cooperative learning, and problem-based learning. A pilot study was subsequently conducted using surveys among sixth- and eighth-semester students to determine the methodologies primarily used by their instructors. The results show that practical and interactive activities that connect theory with real-world applications are valued, highlighting benefits such as the development of technical competencies, soft skills, and improved preparation for job challenges.

**Keywords:** Methodologies, Teaching, Industrial Engineering

## 1. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta una revisión de las metodologías de enseñanza empleadas en la formación de ingenieros industriales, en la cual se evidencia la evolución de los métodos de enseñanza desde los métodos de enseñanza centrados en el profesor hasta los enfoques más centrados en la participación del estudiante (Kofoed et al., 2017). Tal como lo establecen Rodríguez et al., (2020), se encuentran enfoques tales como el aula invertida, el aprendizaje cooperativo y la gamificación, entre otros, los cuales están transformando la educación en ingeniería buscando generar una formación más dinámica por parte del estudiante. Por ejemplo, Torres-Barreto et al., (2020), evidencian que el aprendizaje basado en desafíos presenta resultados efectivos para fomentar las habilidades tales como la expresión oral, la gestión de recursos y el liderazgo de equipos, que enfrenta a los estudiantes a resolver problemas de forma creativa. Por otra parte Sancho et al., (2020) observan que el Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) permite fomentar el aprendizaje fortaleciendo la capacidad analítica, el liderazgo y el trabajo en equipo. Así mismo Mesa et al., (2008), como Apaza Canaza et al., (2022), evidencian que el ABP es una metodología adecuada para integrar la teoría con la práctica generando buenos resultados en competencias técnicas y blandas de los estudiantes.

Metodologías como la gamificación o el aprender-haciendo son consideradas por Acevedo et al., (2020), como herramientas que generan mayor motivación e interés por parte de los estudiantes. Lo cual es reafirmado por autores como Valencia-Rodríguez et al., (2022) quienes evidencian que dicha metodología incrementa la motivación, la retención y el interés de los estudiantes.

Vizhñay-Criollo y Farfán-Pacheco, (2023), consideran por su parte que el aprendizaje cooperativo permite generar el fortalecimiento de la responsabilidad y la comunicación entre los integrantes.

Por otra parte, Castiblanco-Jiménez et al., (2017) y Galarza et al., (2020), evidencian que el aprendizaje experiencial, así como las simulaciones en laboratorios o el empleo de ayudas de enseñanza como Legos son empleadas como herramientas usuales en la enseñanza de la ingeniería industrial.

## 2. ALGUNOS CASOS DE APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS ACTIVAS EN INGENIERÍA INDUSTRIAL.

Al realizar la revisión de artículos se evidenciaron algunos casos de aplicación de las metodologías previamente comentadas, dentro de estos se encuentran:

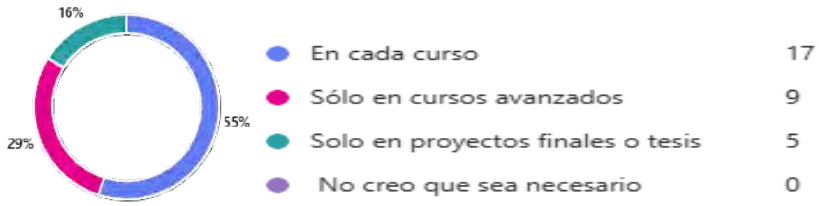
- La construcción e implementación de un estudio de caso presentado por Arango et al. (2016), como una herramienta de apoyo para el aprendizaje en gestión de la producción, en el cual evidencian que esta metodología permite la conexión de la teoría con la realidad.
- Galarza et al. (2020), emplean simuladores y proyectos prácticos para sus estudiantes con el fin de mejorar la comprensión de herramientas de Lean Manufacturing, tales como las 5S, SMED y Kanban.
- El ABP es considerado por Mesa et al., (2008) como una metodología que permite fortalecer la innovación, la planificación y el liderazgo en asignaturas relacionadas con la dirección de proyectos en ingeniería, o el caso de Ruiz-Meza et al. (2021), que evidencian la aplicación de esta metodología en la enseñanza de la gestión de la cadena de suministros.

## 3. APLICACIÓN DE LA ENCUESTA DE METODOLOGÍAS DE ENSEÑANZA

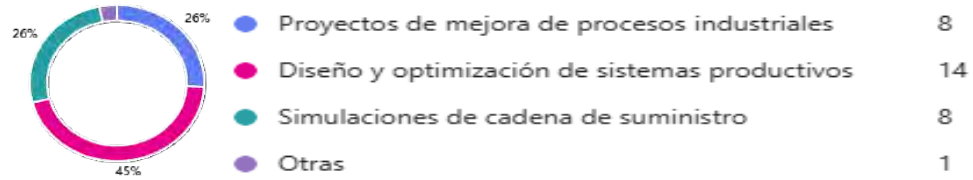
Con el fin de realizar un primer abordaje de las metodologías empleadas en el programa de ingeniería industrial, se aplicó un estudio piloto mediante encuestas a estudiantes de sexto y octavo semestre, con el fin de establecer cuáles eran las metodologías empleadas principalmente por sus docentes. A continuación, se presentan los principales resultados.

1. Aprendizaje basado en proyectos:

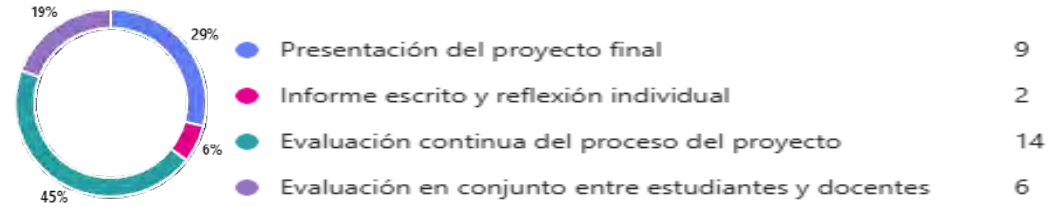
1.1. ¿Con qué frecuencia te gustaría que se implementara el ABP en tus cursos de ingeniería industrial?




1.2. ¿Qué tipo de proyectos consideras más interesantes para aplicar tus conocimientos teóricos en ingeniería industrial?




1.3. ¿Cómo prefieres ser evaluado en un proyecto dentro de un enfoque ABP?

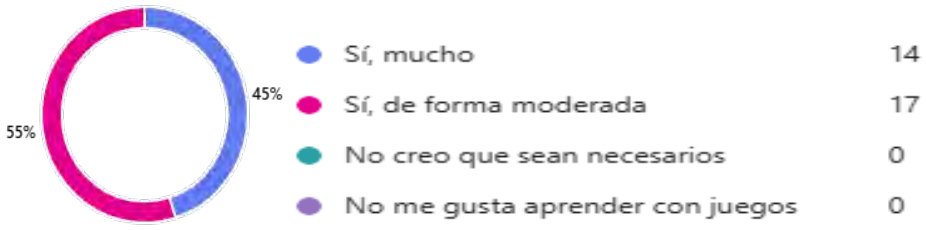



2. Gamificación y aprendizaje basado en juegos:

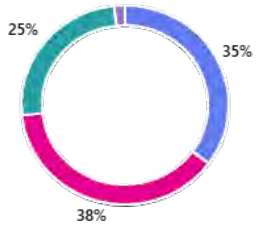
2.1. ¿Qué tan dispuesto estás a participar en actividades de gamificación en tus cursos de ingeniería industrial?




2.2. ¿Te gustaría que tus docentes usaran más juegos (digitales o físicos) para reforzar los temas de la carrera?



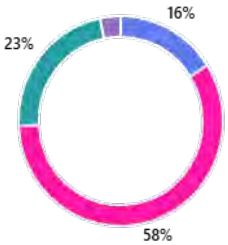
2.3. ¿Qué tipo de juegos crees que serían más útiles para tu aprendizaje en ingeniería industrial?




| | |
|---|---|
| Juegos de simulación de procesos | 21 |
| Juegos de estrategia y toma de decisiones | 23 |
| Juegos de resolución de problemas | 15 |
| Otras | 1 |

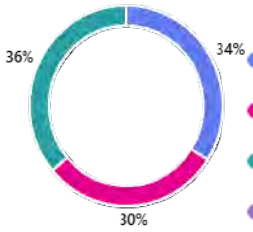
3. Aprendizaje autónomo:

3.1. ¿Qué tan cómodo te sientes tomando un rol activo y autónomo en tu aprendizaje?



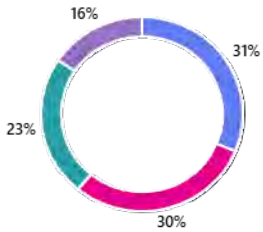

| | |
|---|---|
| Muy cómodo | 5 |
| Cómodo | 18 |
| Poco cómodo | 7 |
| Incómodo | 1 |

3.2. ¿Qué consideras que podría ser más difícil al trabajar de forma autónoma en tus estudios?




| | |
|---|---|
| Mantener la motivación | 16 |
| Seguir un plan de estudio | 14 |
| Encontrar el material adecuado | 17 |
| No veo dificultades en el aprendizaje autónomo | 0 |

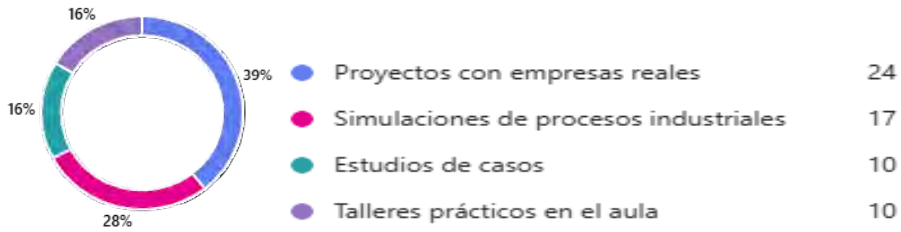
3.3. ¿Qué recursos crees que necesitarías para apoyar tu aprendizaje autónomo?



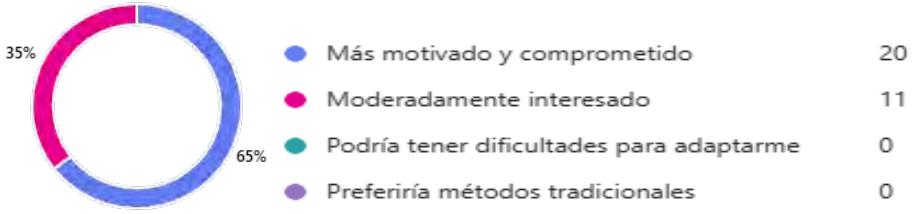

| | |
|---|---|
| Plataformas y herramientas digitales | 20 |
| Guías de estudio claras | 19 |
| Apoyo de un tutor o docente | 15 |
| Mayor tiempo para organizar mis actividades | 10 |

4. Aprendizaje experiencial:

4.1. ¿Qué tipo de actividades crees que serían más efectivas para tu aprendizaje en ingeniería industrial?

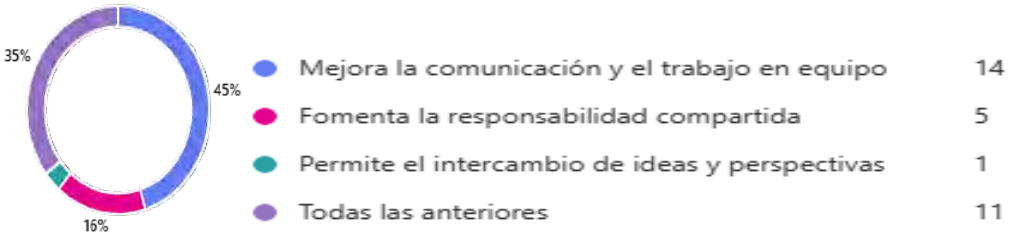



4.2. ¿Cómo crees que te sentirías al aprender de manera experiencial en comparación con métodos tradicionales?

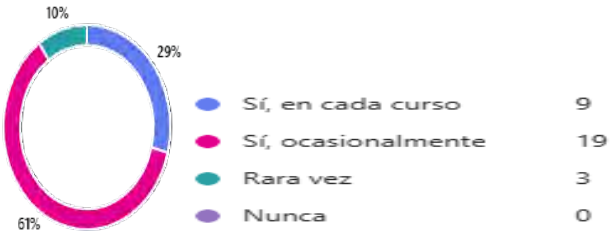



5. Aprendizaje cooperativo:

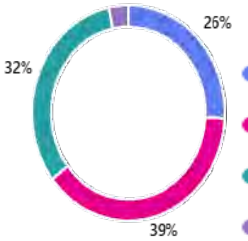
5.1. ¿Qué beneficios crees que aporta el aprendizaje cooperativo en tu carrera?




5.2. ¿Te gustaría trabajar más frecuentemente en equipo en tus clases de ingeniería industrial?



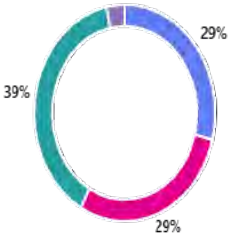
5.3. ¿Qué tipo de actividades en equipo te gustaría realizar en tu carrera?




| | |
|---|---|
| Proyectos colaborativos | 8 |
| Resolución de problemas en equipo | 12 |
| Análisis de casos prácticos | 10 |
| Otras | 1 |

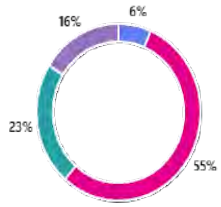
6. Aprendizaje basado en problemas:

6.1. ¿Qué tipo de problemas consideras más interesantes para resolver en un enfoque de aprendizaje basado en problemas en ingeniería industrial?



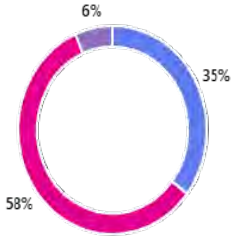

| | |
|---|---|
| Análisis de datos industriales | 9 |
| Proyectos de mejora continua | 9 |
| Gestión de operaciones y logística | 12 |
| Otras | 1 |

6.2. ¿Qué desafíos crees que podrías enfrentar al implementar aprendizaje basado en problemas en tus cursos?




| | |
|---|---|
| Falta de recursos tecnológicos | 2 |
| Dificultades para desarrollar problemas adecuados | 17 |
| Dificultades para trabajar en equipo | 7 |
| No creo que haya grandes desafíos | 5 |

6.3. ¿Crees que el ABP puede mejorar tu preparación para enfrentarte a problemas reales en la industria?




| | |
|---|---|
| Sí, es crucial para mi desarrollo profesional | 11 |
| Sí, pero requiere ajustes según el curso | 18 |
| No es relevante para todos los problemas industriales | 0 |
| No estoy seguro de su impacto | 2 |

## 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las encuestas aplicadas a los estudiantes, proporcionó información valiosa sobre sus preferencias, percepciones y experiencias respecto a las metodologías de enseñanza-aprendizaje. Este análisis detalla las actividades preferidas, los beneficios percibidos y los aspectos que se consideran necesarios para mejorar.

Los estudiantes muestran un alto interés en el aprendizaje experiencial y el aprendizaje cooperativo, que les permiten aplicar la teoría a la práctica de manera directa. Prefieren actividades como prácticas en laboratorios, simulaciones de procesos industriales y proyectos con impacto social o ambiental, las cuales consideran que fortalecen sus habilidades prácticas y aumentan su confianza para enfrentar retos profesionales. También expresan entusiasmo por la gamificación, valorando juegos que combinen creatividad e interacción, como simulaciones de cadenas de suministro, retos virtuales y competiciones en plataformas digitales. Estas estrategias les ofrecen una experiencia dinámica y atractiva, a la vez que mejoran su motivación y aprendizaje interactivo. Aunque dispuestos a asumir roles autónomos, los estudiantes reconocen que necesitan mayor orientación y recursos para afrontar este enfoque. Actividades como el uso de plataformas de aprendizaje en línea, proyectos individuales guiados y tareas flexibles serían ideales para apoyarlos, desarrollando su capacidad de autogestión, investigación independiente y toma de decisiones fundamentadas.

## 4. CONCLUSIONES.

1) Los estudiantes coinciden en valorar metodologías prácticas, dinámicas e interactivas que conectan los conocimientos teóricos con aplicaciones reales, destacando el aprendizaje basado en proyectos (ABP), la gamificación y el aprendizaje experiencial como especialmente efectivas.
2) Las metodologías evaluadas fortalecen competencias técnicas como la resolución de problemas y habilidades blandas como el liderazgo, la comunicación y la colaboración, preparando a los estudiantes para enfrentar los desafíos del mercado laboral.
3) Los estudiantes requieren mayor orientación, apoyo y recursos tecnológicos para asumir roles más autónomos y aprovechar al máximo las metodologías activas en su aprendizaje.
4) Superar estos desafíos es esencial para integrar de manera óptima las metodologías de enseñanza-aprendizaje en el programa de ingeniería industrial y garantizar una experiencia formativa significativa.

## 5. REFERENCIAS.


- Acevedo-Suárez, J. L., Castro, L., & Cevallos, R. (2020). Aplicación del concepto “Aprender-Haciendo” en la enseñanza de la ingeniería industrial: Casos de estudio. *Revista Educación en Ingeniería*, 15(29), 65–74. https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/770/775
- Arango, J., Vásquez, C., & Benjumea, M. (2016). Construcción e implementación de un estudio de caso como herramienta de apoyo a los procesos de aprendizaje en la asignatura de producción desde un enfoque constructivista. *Ingeniare: Revista chilena de ingeniería*, 24(3), 403–414. https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ingeniare/article/view/403/314
- Castiblanco-Jiménez, J. C., López-Salazar, J. A., & Perilla-Gómez, C. E. (2017). Implementación de InventionSystem Kits como metodología de enseñanza y aprendizaje en

ingeniería industrial. Caso de estudio: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. *Revista Educación en Ingeniería*, 12(24), 57–65. https://educacioneningenieria.org/index.php/edi/article/view/765/325

- Galarza-Cevallos, M., Donneys-Muñoz, W., & Londoño-Silva, I. M. (2020). Una mirada integral de las didácticas activas en la enseñanza-aprendizaje del Lean Manufacturing. *Revista LOGINN: Investigación Científica y Tecnológica*, 4(1), 31–48. https://revistaloginn.com
- Mesa, J. M., Álvarez, J. V., Villanueva, J. M., & de Cos, F. J. (2008). Actualización de métodos de enseñanza-aprendizaje en asignaturas de dirección de proyectos de ingeniería. *Formación Universitaria*, 1(4), 15–22. https://doi.org/10.4067/S0718-50062008000400004
- Sancho, J., Villalba, F., & Martínez, A. (2020). El aprendizaje basado en problemas como metodología y sistema de evaluación en el máster universitario de ingeniería industrial. *Revista Educación en Ingeniería*, 15(29), 55–64. https://educacioneningenieria.org/index.php/edi/article/view/5837
- Valencia-Rodríguez, D., Gómez, H., & Patiño, J. (2022). Áreas de interés para la incorporación de la gamificación en la enseñanza de la ingeniería industrial. *Revista Educación en Ingeniería*, 17(34), 85–97. https://educacioneningenieria.org
- Vizhñay-Criollo, J. P., & Farfán-Pacheco, P. C. (2023). Implementación del aprendizaje cooperativo como estrategia didáctica para mejorar el rendimiento académico en Lengua y Literatura. *INNOVA ResearchJournal*, 8(2), 32–51. https://doi.org/10.33890/innova.v8.n2.2023.2226

# ACTUALIZACIÓN DE LAS HABILIDADES EN EL CONTEXTO LABORAL (RESKILLING & UPSKILLING)

Brottier Lucía, Caliguli Elena; Cardozo Marcos, Del Olmo Juan Cruz, Manzur Horacio, Nállim Carlos A.

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza.*

*lucia.brottier@ingenieria.uncuyo.edu.ar; lucia.brottier@hotmail.com*

**RESUMEN**

En un mercado laboral en constante cambio y en la transición hacia organizaciones basadas en habilidades, que promueven estructuras más ágiles y auto gestionadas, la capacidad de adaptarse rápidamente a las demandas del mercado y al uso de nuevas tecnologías es imprescindible. La Ingeniería Industrial con el foco en la optimización no puede quedarse al margen.

Aprender a aprender, mejorar habilidades, adquirir nuevas habilidades, reinventarse, fortalecer habilidades que no prescriben o atemporales, estos son los ejes de encuestas y entrevistas realizadas para identificar si hay sectores industriales y funciones más vulnerables.

El relevamiento realizado a trabajadores y a responsables de áreas de Capital Humano brindan aportes y diferentes enfoques y buenas prácticas para encarar esta transformación desde la formación y desarrollo en el trabajo donde la actitud individual es clave a pesar o aprovechando los avances tecnológicos

**Palabras Claves:** Competencias – Habilidades – Formación – Tecnologías - Trabajo

**ABSTRACT**

In a constantly changing labor market and the transition toward skills-based organizations that promote more agile and self-managed structures, the ability to quickly adapt to market demands and the use of new technologies is essential. Industrial Engineering, with its focus on optimization, cannot be left out.

Learning to learn, improving skills, acquiring new skills, reinventing oneself, and strengthening skills that are timeless or non-prescribed—these are the key themes of surveys and interviews conducted to identify any more vulnerable industrial sectors and functions.

The survey of Workers and Human Capital Managers provides insights, different approaches, and best practices for addressing this transformation through on-the-job training and development, where individual attitude is key despite or even taking advantage of technological advances

**Keywords:** Competencies – Skills – Training – Technologies – Work

## 1. INTRODUCCIÓN

Aprender, desaprender, reaprender es una de las nuevas habilidades que se requieren para abordar los cambios principalmente tecnológicos, pero también culturales que se producen cada vez con un ciclo más corto, más vertiginoso de renovación.

Ya ha quedado atrás la idea de una formación única para toda la vida. La renovación del conocimiento constante obliga a los profesionales, pero no solo a ellos, a mantenerse en un proceso de actualización continua. El mercado laboral contemporáneo cada vez más hace foco en habilidades blandas como la adaptabilidad, la comunicación efectiva, el pensamiento crítico y la capacidad de aprendizaje permanente que se ha acuñado con el concepto de Learnability, que traducido al español como facilidad de aprendizaje o aprendibilidad — se entiende como la capacidad de un individuo, sistema o entorno educativo para posibilitar que nuevas competencias, procedimientos y conocimientos sean adquiridos de manera eficaz y eficiente (Nielsen, 1993; ISO 9241-11, 2018).

Por otra parte, se puede evidenciar que este concepto de Learnability está incluido en los estándares de acreditación de las carreras que están enmarcadas en la nómina del artículo 43 de la Ley de Educación Superior que reúne a las profesiones reguladas por el Estado, cuyo ejercicio pudiera comprometer el interés público, poniendo en riesgo de modo directo la salud, la seguridad, los derechos, los bienes o la formación de los habitantes.

Particularmente para la Ingeniería Industrial (pero que también se replica en otras ingenierías) las «competencias de egreso» son las requeridas para acceder al título «Ingeniero Industrial» y dan cumplimiento a los descriptores de conocimiento establecidos en la Resolución Ministerial N° 1543/2021 - ANEXO I para cada uno de los bloques de conocimiento. Se dividen en competencias específicas de egreso para dar contenido a las Alcances del Título y competencias genéricas de egreso técnicas y competencias genéricas de egreso sociales, políticas y actitudinales. En este último grupo de competencias se especifica la de “Aprender en forma continua y autónoma participando activamente en la elaboración de los propios trayectos de aprendizaje y reconociendo la necesidad de perfeccionarse permanentemente, en un contexto de cambio tecnológico donde es necesaria la formación durante toda la vida”

### 1.1. Objetivo

El objetivo de este proyecto ha sido relevar si se conoce el concepto de Learnability en el mercado laboral y en el ámbito académico y que acciones o estrategias para el desarrollo profesional, se llevan a cabo actualmente para su efectiva implementación. Para ello incorporamos la clasificación de Upskilling y Reskilling en las consultas realizadas a trabajadores.

### 1.2. Marco Teórico

El Reskilling refiere al proceso mediante el cual un individuo adquiere nuevas competencias para desempeñar funciones distintas a las que realizaba previamente, favoreciendo su empleabilidad en áreas emergentes o en reconversión.

Por su parte, el Upskilling consiste en el fortalecimiento y actualización de las competencias ya existentes, con el fin de mejorar el desempeño en el rol actual y responder a mayores niveles de exigencia técnica o tecnológica (World Economic Forum, 2020).

En el siguiente cuadro se presenta una comparación de estos dos conceptos.

*Tabla N°1 Comparación de conceptos*

| Concepto | RESKILLING | UPSKILLING |
|---|---|---|
| Definición | Proceso de adquisición de nuevas competencias para desempeñar funciones diferentes a las actuales | Proceso de actualización y profundización de competencias ya existentes. |
| Objetivo principal | Reorientar la trayectoria profesional hacia nuevos roles o áreas emergentes. | Mejorar el desempeño y la eficiencia en el rol actual. |
| Aplicación a Ingeniería Industrial | Un ingeniero industrial que se formó en logística tradicional y se capacita en analítica de datos y Big Data para gestionar cadenas de suministro digitales. | Un ingeniero industrial que ya trabaja en gestión de calidad y realiza cursos de Lean Six Sigma avanzado para optimizar procesos de producción |

### 1.3. Estado del Arte

El estado del arte sobre Learnability, Reskilling y Upskilling muestra una creciente atención en la literatura académica y empresarial.

Según el World Economic Forum (2023), el 50% de los trabajadores necesitarán actualizar sus competencias para 2027.

McKinsey & Company (2020) destaca que las empresas que invierten en el desarrollo continuo de sus empleados son más resilientes ante los cambios tecnológicos.

PwC (2022) revela que la percepción de la IA como oportunidad o amenaza influye en la disposición de los empleados a capacitarse.

La OIT (2021) recomienda fomentar culturas organizacionales que promuevan la colaboración con la IA y reduzcan el miedo al reemplazo.

Estas fuentes coinciden en que las habilidades blandas como adaptabilidad, pensamiento crítico y comunicación son cada vez más valoradas por su transversalidad y dificultad de automatización.

Los informes recientes de Criteria Corp revelan que el mercado laboral está atravesando una transformación profunda, impulsada por la escasez de talento, el avance de la inteligencia artificial (IA) y el cambio en las expectativas de los candidatos. En este contexto, el **upskilling** y el **reskilling** emergen como estrategias clave para enfrentar los desafíos actuales y futuros.

- **Escasez de talento y necesidad de nuevas habilidades**: El 74% de los profesionales de contratación afirma que es difícil encontrar candidatos con las habilidades adecuadas, y el 67% considera que estamos frente a una escasez de talento. Esto ha llevado a que el **upskilling de empleados actuales** sea una de las tres principales prioridades organizacionales para el próximo año, junto con la eficiencia en la contratación y la reducción de la rotación laboral. [Criteria_R...markReport]
- **Cambio en las competencias más valoradas**: Las habilidades más demandadas para el futuro no son técnicas, sino humanas: pensamiento analítico, flexibilidad/agilidad e inteligencia emocional. Esto sugiere que el **upskilling** no solo debe enfocarse en herramientas digitales, sino también en habilidades blandas que permiten adaptarse a entornos laborales cambiantes. [Criteria_R...markReport]
- **Reskilling como respuesta a la movilidad laboral**: El 55% de los candidatos está buscando cambiar de industria o rol, lo que representa una oportunidad para aplicar estrategias de **reskilling** que les permitan adquirir competencias nuevas y adaptarse a sectores emergentes. Las organizaciones están adoptando enfoques de contratación basados en habilidades para evaluar el potencial más allá de la experiencia previa. [2025_Candi...nce_Report]
- **Impacto de la IA en la contratación y el aprendizaje**: La IA está modificando tanto los procesos de selección como las trayectorias de aprendizaje. El 43% de las empresas ya tiene programas para mejorar la competencia en IA de sus empleados, lo que se alinea con el enfoque de **upskilling** en tecnologías emergentes. [Criteria_R...markReport]
- **Preferencias de los candidatos**: Los candidatos valoran cada vez más las oportunidades de crecimiento profesional. En el ranking de prioridades laborales, el desarrollo de carrera supera incluso a la compensación económica, lo que refuerza la importancia de ofrecer programas de **upskilling** como parte de la propuesta de valor del empleador. [2025_Candi...nce_Report]

### 1.4. Metodología aplicada

El presente artículo es el resultado parcial de un proyecto más extenso que se encuentra aún en elaboración, ya que desde la perspectiva de la formación universitaria, Learnability no solo implica la rapidez con la que los estudiantes pueden incorporar y transferir nuevos saberes, sino también el grado en desde los espacios curriculares, sus proyectos pedagógicos referidos en los programas, las metodologías didácticas aplicadas y las herramientas tecnológicas (uso del Aula abierta, por ejemplo) están diseñados para favorecer ese aprendizaje continuo y autónomo.

Las conclusiones presentadas en este artículo compilan los resultados de diferentes encuestas digitales realizadas por estudiantes de Ingeniería Industrial y Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo en el marco del espacio curricular Gestión de las Personas con la consigna de relevar las habilidades requeridas para una mejor inserción laboral en este mundo cambiante. Las encuestas fueron realizadas a través de formularios de GoogleForms y luego procesadas y presentados sus resultados y conclusiones.

Al respecto cada grupo de estudiantes elaboró las encuestas y se difundieron en el mes de mayo del 2025. La selección de la muestra solo tuvo como restricción que fuera dirigidas a estudiantes de ingeniería y a personas que se encontraran trabajando. En algunos casos se relevaron el tipo de industrias, pero no en todos, por ello no se ha considerado relevante la información.

Se indican a continuación los resultados más relevantes realizados a través de

- encuestas (formularios de GoogleForms enviados por mail o WhatsApp) y
- entrevistas (dialogo con los referentes con preguntas estructuradas que se analizaron para las conclusiones

Todas las encuestas y entrevistas tuvieron la misma pregunta abierta "*¿Qué crees que debería enseñarse hoy para prepararse mejor frente a los cambios tecnológicos*? Esta respuesta era opcional.

### 1.4.1 Capacidad de aprender nuevas habilidades.

Un grupo relevó la percepción de los encuestados con respecto a una primera pregunta de investigación. Se planteó si "*La capacidad de aprender nuevas habilidades (Learnability) se está convirtiendo en una de las competencias más valoradas por las organizaciones, ya que permite a los empleados adaptarse con mayor rapidez a los cambios del entorno laboral*"

La encuesta se realizó a 78 personas de las cuales el 75% trabaja o trabaja y estudia y el 25% sólo estudia. El 41% de los encuestados con edades menores de 30 años y el resto mayor a 30 años.

Si bien solo el 25% identificó inicialmente el concepto de Learnability, una vez explicado el 94% coincidió que la capacidad de aprender es esencial en el entorno laboral. Y el 63% consideró que es más importante la disposición y capacidad de aprender que contar con los conocimientos técnicos específicos.

Con respecto a la promoción del aprendizaje continuo tanto en los espacios de trabajo como académico, se obtuvieron las respuestas siguientes (1: Muy poco hasta 5 Mucho).

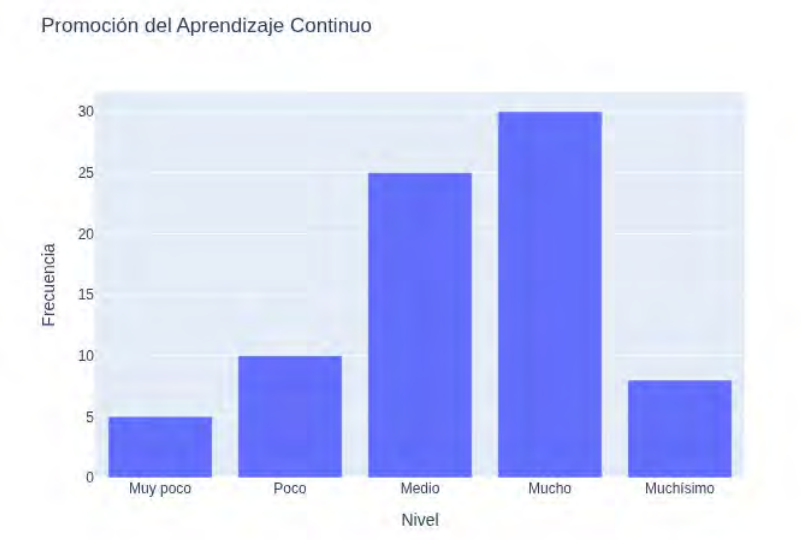



*Gráfico N°1 Promoción del Aprendizaje Continuo*

También se les pidió en la encuesta ponderar cinco habilidades de Resiliencia, Trabajo en equipo, Learnability, Pensamiento Crítico y Comunicación trabajando los datos como un sistema de puntuación, donde la valoración 5 (más importante) otorga cinco puntos y la valoración 1 (menos importante) otorga

un punto, encontramos que para la percepción de esta muestra encuestada que la Learnability se ubica como la segunda habilidad más importante en el mundo laboral actual, precedida por el trabajo en equipo - lo que es lógico por la interdisciplinaridad de los procesos - como se indica en la siguiente tabla:

*Tabla N°2 Ponderación de Habilidades relevadas*

| Puntuación | Resiliencia | Trabajo en equipo | Learnability | Pensamiento Crítico | Comunicación |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 46 | 5 | 4 | 10 | 13 |
| 4 | 14 | 11 | 18 | 17 | 18 |
| 3 | 13 | 13 | 28 | 18 | 6 |
| 2 | 3 | 44 | 14 | 6 | 11 |
| 1 | 9 | 8 | 18 | 20 | 23 |
| TOTAL | 170 | 282 | 270 | 222 | 226 |

### 1.4.2. Impacto en los desafíos laborales actuales.

Un segundo grupo relevó datos para verificar una segunda pregunta de investigación que surgió de considerar que la creciente demanda de habilidades en nuevas tecnologías, como inteligencia artificial y análisis de datos, combinada con la inestabilidad laboral, dificulta la inserción laboral de las personas que no logran actualizar sus competencias profesionales y nos plateamos si "*La mayoría de las personas creen que las habilidades que aprendieron en su formación inicial ya no son suficientes para afrontar los desafíos laborales actuales*" y por otra parte si "*la falta de conocimientos en inteligencia artificial, procesamiento y análisis de datos es percibida como una desventaja en procesos de selección laboral".*

En este caso se realizó una encuesta a 119 personas de las cuales 55,5% posee empleo formal, 14,3% tiene empleo informal y el 4,2% no está trabajando, pero busca empleo. El 26,1% solo estudia.

Se les preguntó a los participantes acerca de las habilidades digitales que poseen y como ellos mismos calificarían su nivel general de conocimientos. Los resultados que se encontraron fueron que la mayoría (66,4%) percibe que sus conocimientos son funcionales, pero no suficientes, sólo el 21% dice tener alto nivel de conocimientos y el 12,6% considera tener un bajo nivel.

Con respecto a las áreas donde poseen sus conocimientos las personas dijeron tener el 89,1% conocimientos en manejo de herramientas ofimáticas (Word, Excel, Power Point, etc); el 48,7% conocimientos en uso y manejo de redes sociales y marketing digital y el 30,3% de los encuestados dijo utilizar inteligencia artificial o automatización.

Detrás quedaron las habilidades como: programación 23,5%; análisis de datos/Excel avanzado o Power BI 21,8%; diseño gráfico o UX7 6%. El 9,2%. dicen no tener conocimientos. Es decir, hay conocimiento de uso general y cotidiano de las herramientas tecnológicas simples, pero los porcentajes son considerablemente menores con respecto de las competencias más técnicas y específicas lo que sugiere una brecha entre el uso instrumental de la tecnología y el dominio de las herramientas avanzadas con alto valor estratégico en el mercado laboral.

El 59,7% indicó que adquirió estos conocimientos en la universidad de modo formal y el 56% refiere como fuente el autoaprendizaje en la experiencia laboral y cursos informales como YouTube, Udemy, Coursera. Un 6% indicó no tener formación en habilidades digitales, lo que constituye una potencial exclusión digital actual. Esto valida que la formación inicial ya no es suficiente para afrontar los desafíos laborales actuales

Con respecto a la inserción laboral, el 55,5 % de los encuestados percibe que la falta de habilidades digitales influye negativamente en sus oportunidades laborales y un 22.7% afirmó que las afecta considerablemente. La percepción de desventaja y la presión por actualizarse tecnológicamente indican que el Reskilling se vuelve una herramienta clave para prevenir futuras exclusiones del mercado laboral ya que solo el 12, 6 % percibe que tiene conocimientos digitales suficientes y el 76,5% que tiene conocimientos útiles, pero no suficientes.

Aún así el 43.7% informó que no ha tenido inconvenientes en el acceso a oportunidades laborales, un 21.8% de los encuestados indicó que ha perdido o dejado pasar opciones laborales por no contar con los conocimientos digitales requeridos.

### 1.4.3. La Inteligencia Artificial (IA) en el trabajo.

Un tercer grupo tomó la tercera pregunta de investigación. Surgió de considerar que en el contexto de la transformación digital y la creciente integración de la inteligencia artificial en los entornos laborales, las percepciones de los empleados respecto a esta tecnología (IA) juegan un rol clave en su predisposición al aprendizaje, que se planteó de la siguiente manera: "*Los empleados que perciben a la inteligencia artificial como una oportunidad y no como una amenaza están más dispuestos a participar en procesos de actualización de habilidades."*

Se realizó una encuesta a 72 personas que se encuentran trabajando actualmente. que el 94,8 % de los encuestados dio una opinión favorable al respecto al uso de inteligencias artificiales en el trabajo. El 70% consideró que esta tecnología representa una oportunidad para mejorar su desempeño, optimizar procesos y aumentar su productividad y están interesados en capacitarse y el 43% efectivamente ha participado de alguna capacitación para la aplicación de la Inteligencia Artificial.

En el gráfico siguiente se indican las frecuencias de elección

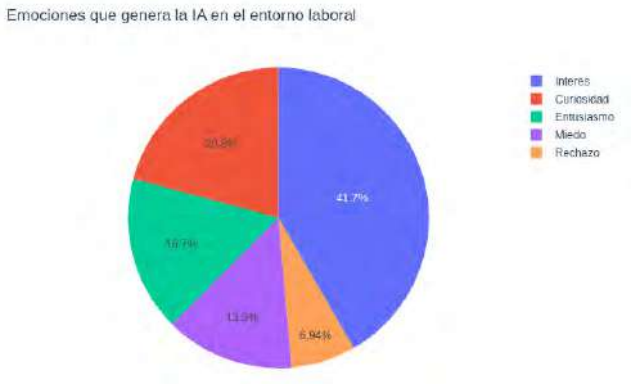



*Gráfico N°2 Emociones que genera la IA en el entorno laboral*

### 1.4.4. Las competencias digitales en los procesos de selección laboral.

Un cuarto grupo investigó con respecto a la percepción de los encuestados sobre la inserción laboral y los requerimientos de competencias digitales. Con respecto a la hipótesis de que la creciente demanda de habilidades en nuevas tecnologías, como la inteligencia artificial (IA) y Big Data está generando una transformación en el mercado laboral en Argentina, que ha dado lugar a la necesidad de desarrollar habilidades blandas, como la resiliencia, la flexibilidad y el aprendizaje permanente se consultó si las mismas son un factor determinante en el proceso de selección de postulantes.

En esta encuesta participaron 101 personas distribuidos un 56,8 % hasta 30 años recientemente ingresados al mundo laboral y un 43,2% mayor de 30 años con más trayectoria laboral.

Con respecto a las nuevas tecnologías aún no tienen una amplia implementación en las organizaciones, ya que el 46,6% votó que no se emplean y aproximadamente el 40% de los encuestados calificaron su uso con 3 (medio) en una escala de 1 a 5.

Sin embargo, un porcentaje similar de participantes también coincidió en que es fundamental para las organizaciones que los empleados dominen estas herramientas. Además, el 50% de los encuestados afirmó que las habilidades en nuevas tecnologías tienen una influencia significativa a la hora de conseguir empleo en nuestro país. Esto sugiere que, aunque en el presente su adopción no es significativa, se prevé un aumento en su uso en el futuro, impulsado por la creciente percepción de su importancia dentro del entorno laboral y su impacto en la empleabilidad.

En la consulta sobre las habilidades blandas y su requerimiento en el mercado laboral el 41% de los encuestados afirmó que la resiliencia para la adaptación ante cambios y desafíos tecnológicos se ha vuelto más importante en los profesionales a medida que las empresas incorporan nuevas tecnologías.

Asimismo, el 36,4% de los participantes destacó que la flexibilidad es ahora más valorada por las empresas en respuesta a los rápidos avances en IA y Big Data. Y el 58% de los encuestados consideró que la capacidad de aprendizaje continuo (Learnability) se ha convertido en una habilidad clave para los profesionales en el contexto de la evolución de las tecnologías aplicadas como la IA y el Big Data.

La percepción del 64% de los encuestados es que las búsquedas actualmente enfatizan la importancia de habilidades blandas como resiliencia, flexibilidad y aprendizaje continuo.

### 1.4.5. Propuestas de los entrevistados/ encuestados

Por último, en las diferentes encuestas se realizó la consulta abierta de *"¿Qué crees que debería enseñarse hoy para prepararse mejor frente a los cambios tecnológicos*?", entre las respuestas se han agrupado los siguientes ítems que se destacan por su repetición, pero no constituyen una transcripción de las mismas:

a) **Inteligencia artificial:** cómo y cuándo utilizarla, principales softwares a implementar. Las implicancias éticas y reflexivas de su uso y aplicaciones específicas en el ámbito laboral/académico. Esta fue la herramienta más repetida como respuesta.
b) **Análisis y gestión de datos**: uso de Excel desde un nivel básico hasta avanzado, Power BI y la interpretación de los datos obtenidos con este tipo de herramientas.
c) **Programación, automatización y robótica**: lenguaje de programación básico, robótica, modelado 3D, automatización de procesos con la utilización de IA.
d) **Herramientas de uso común:** en este se incluyó paquetes ofimáticos, plataformas laborales y educativas.
e) **Ciberseguridad y navegación segura:** los encuestados destacaron tomar conciencia sobre "phishing" y "hacking", uso de herramientas y sitios seguros. También, protección de datos personales y corporativos.
f) **Habilidades blandas**: como la flexibilidad y el control y gestión de emociones.

## 1.5. Uso de herramientas digitales en las Prácticas Profesionales Supervisadas (PPS)

En el primer semestre del 2025 se presentaron 35 informes finales de Prácticas Profesionales Supervisadas de estudiantes de la carrera Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de Cuyo. Las mismas fueron realizadas entre agosto del 2024 y julio del 2025.

Se evidencia desde el 2024 un aumento en la aplicación de herramientas digitales en las actividades que se realizan en las PPS y que particularmente se les asignan proyectos en los que se tiene como objetivos relevar información, optimizar bases de datos, presentar los datos de manera visual y más fácil de interpretar por todos los involucrados.

Se utilizó la familia de modelos de inteligencia artificial (IA) desarrollados por Google Gemini, diseñada para ser multimodales y entender el texto, la voz, las imágenes y el código que analizó los 35 informes de Prácticas Profesionales identificando más de 80 mencionadas en los mismos y se obtuvo la siguiente tabla de usos, agrupadas por tipo de herramientas digitales.

*Tabla N°3 Relevamiento de herramientas digitales*

| Categoría | Herramientas incluidas | Uso aproximado (según recuento) |
|---|---|---|
| Ofimática y Productividad | Excel, Word, PowerPoint, Google Docs, Google Sheets | Muy alto (Excel es la más usada de todas) |
| Análisis de Datos y BI | Power BI, Power Query, Tableau | Alto |
| Comunicación y Colaboración | Outlook/Correo, Teams, Meet, Zoom, Slack, Trello | Alto |
| Gestión Empresarial / ERP | SAP, Infor LN, Dynamics, NetX360, NetXInvestor, ERP genéricos | Medio |
| Programación y Automatización | VBA, Python, R, SQL, Matlab, Power Automate | Medio |

| | | |
|---|---|---|
| Diseño e Ingeniería | AutoCAD, Visio, SolidWorks, SketchUp | Bajo a medio |
| Formularios y Encuestas | Google Forms, Microsoft Forms, SurveyMonkey | Bajo |
| Metodologías y Marcos de Trabajo | Scrum, Kanban, Metodologías Ágiles | Bajo |
| Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos | IA, Machine Learning, ChatGPT | Bajo (incipiente) |
| Sistemas Especializados | LIMS, CRM, software financiero | Bajo |

Se puede resumir que:

a) **Excel** y la **ofimática tradicional** concentran la mayor parte del uso
b) Luego destacan **Power BI/Query** y **Teams/Outlook/Meet** como segunda capa de uso
c) Herramientas de **automatización, IA y metodologías ágiles** aparecen, pero con menor frecuencia.

En los coloquios finales de PPS los estudiantes manifiestan en su mayoría un aprendizaje autónomo de estas herramientas ya sea por propia motivación o porque se ven en la necesidad de usarlas y estudian su aplicación. Algunas organizaciones, pero muy pocas (las que prestan servicios digitales o de consultoría) les han brindado cursos para que pudieran hacer un mejor uso de ellas.

## 2 RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 2.1. Los cambios tecnológicos

Las innovaciones tecnológicas que se viven habitualmente en todos los ámbitos con un ciclo cada vez más vertiginoso nos obligan a estar siempre aprendiendo, incluso desaprendiendo y reaprendiendo. Con el impacto de la Inteligencia Artificial que se está llevando a muchos procesos para la optimización de los mismos, como las diversas aplicaciones disponibles requiere que estemos dispuestos a acompañar este cambio con flexibilidad, resiliencia y adquisición de nuevas competencias técnicas y digitales principalmente.

### 2.2. Los cambios en las competencias requeridas

Como se indicó en el marco teórico las transformaciones tecnológicas afectan los procesos productivos y en consecuencia las habilidades que se requieren en el ámbito laboral. Las organizaciones invierten en las competencias requeridas por sus empleados para afrontar estos cambios.

En este escenario los conceptos de reskilling (adquisición de nuevas habilidades para cambiar de rol) y upskilling (mejora de habilidades para desempeñar mejor el mismo rol) cobran una importancia estratégica sumado al avance del uso de la Inteligencia Artificial en diferentes actividades y procesos.

### 2.3. Aplicación al ámbito académico

En carreras de perfil interdisciplinario como la Ingeniería Industrial, la Learnability se presenta como un factor central, dado que los futuros profesionales deben adaptarse a contextos dinámicos y complejos, caracterizados por la integración de saberes provenientes de la gestión, la tecnología, la economía y la sustentabilidad. Promover la Learnability en este ámbito implica no solo facilitar la asimilación de herramientas y metodologías específicas, sino también fortalecer la capacidad de aprendizaje autónomo y continuo, considerada indispensable para enfrentar los desafíos actuales.

En este sentido, promover la Learnability en la formación de ingenieros industriales supone:

- Diseñar planes de estudio flexibles y orientados a la resolución de problemas.
- Incorporar metodologías activas (aprendizaje basado en proyectos, simulaciones, laboratorios virtuales).
- Fomentar el pensamiento crítico y la transferencia de aprendizajes entre disciplinas.
- Utilizar tecnologías educativas que reduzcan la curva de aprendizaje en el uso de software, sistemas de información y metodologías de gestión.

Las instituciones de educación superior tienen un rol clave en el desarrollo de habilidades blandas, especialmente en la formación de ingenieros que respondan a las demandas actuales del sector tecnológico. Para lograrlo, es fundamental que desde la universidad equilibremos la enseñanza de competencias técnicas con el fortalecimiento de habilidades como el trabajo en equipo, la comunicación y la creatividad, manteniendo un diálogo constante con la industria para adaptarse a sus necesidades en evolución.

Además, se destaca la importancia de una colaboración activa entre la academia, la industria y los responsables de políticas educativas, con el objetivo de definir con mayor claridad las habilidades de empleabilidad más relevantes para los estudiantes. Comprender cómo perciben ellos mismos estas competencias también forma parte esencial del proceso de mejora continua en la formación profesional.

La principal dificultad en el uso de estas herramientas en el ámbito académico está dada por las licencias requeridas para poder ser utilizadas por los estudiantes. Aunque muchas de ellas tienen accesos gratuitos si bien con ciertas limitaciones, es necesario avanzar en proponer un uso más generalizado de las mismas.

## 3. CONCLUSIONES.

La incorporación del concepto de *Learnability* en la formación de ingenieros industriales resulta especialmente pertinente debido a las exigencias actuales del mercado laboral y los constantes cambios tecnológicos, organizacionales y sociales que caracterizan a la industria contemporánea.

A diferencia de otras disciplinas más acotadas, la Ingeniería Industrial se distingue por su amplitud y versatilidad, lo que demanda profesionales capaces de adaptarse con rapidez a nuevas herramientas, metodologías y contextos de aplicación. En este marco, la *Learnability* se configura como una competencia transversal que permite no solo la rápida asimilación de conocimientos técnicos, sino también la integración de perspectivas interdisciplinares orientadas a la resolución de problemas complejos.

Esta primera parte del trabajo que ha relevado la percepción de los trabajadores y estudiantes con relación a la forma de hacer frente a los cambios tecnológicos nos ha permitido identificar que efectivamente se evidencia la necesidad de adquirir y/o actualizar competencias especialmente las digitales para no devenir en una exclusión laboral.

La gran variedad de industrias y áreas de desempeño en las que impactan estos cambios indican que es una tendencia generalizada si bien la estamos considerando desde su impacto en los profesionales de la ingeniería industrial. Esto se evidencia en el relevamiento realizado a través de los resultados descriptos de las experiencias de Prácticas Profesionales Supervisadas de nuestros estudiantes.

Asimismo, el desarrollo de la *Learnability* en el ámbito universitario contribuye a formar profesionales con capacidad de aprendizaje autónomo y continuo, preparados para enfrentar escenarios de innovación, transformación digital y sostenibilidad. Esto resulta fundamental en una época en la que las habilidades adquiridas en la etapa de formación inicial se vuelven rápidamente obsoletas si no se acompañan de la disposición y la aptitud para seguir aprendiendo a lo largo de la vida profesional. De este modo, abordar la *Learnability* como objeto de estudio en la carrera de Ingeniería Industrial se justifica tanto por la necesidad de responder a las demandas del sector productivo como por el compromiso académico de promover una educación superior de calidad, flexible y orientada al futuro.

Queda avanzar en nuestro proyecto en el relevamiento de las herramientas que se aplican desde la carrera a través de los espacios curriculares para fortalecer estas necesidades detectadas ya que deberían incorporarse para mejorar la inclusión digital.

Integrar el enfoque de *reskilling* y *upskilling* en la carrera implica no solo preparar a los futuros profesionales para enfrentar cambios en los procesos productivos y organizacionales, sino también dotarlos de una mentalidad de **aprendizaje continuo** y **adaptabilidad**. En este sentido, la *learnability* actúa como fundamento de ambas estrategias, ya que posibilita que el estudiante se convierta en un profesional capaz de reaprender, actualizarse y reinventarse a lo largo de toda su trayectoria laboral.

## 4. REFERENCIAS.

Honorable Congreso de la Nación Argentina. Ley 24521 de Educación Superior (1995). Disposiciones preliminares. Educación superior. Educación superior no universitaria. Educación superior universitaria.

Disposiciones complementarias y transitorias. Recuperada de https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-24521-1995-25394

Universidad Nacional de Cuyo, (2022). Ordenanza N° 020/22-CS Plan estratégico 2030. Recuperado de https://www.uncuyo.edu.ar/transparencia/plan-estrategico-2030

Ministerio de Educación. Resolución Ministerial N° 1254/2018. Determina los “alcances del título” de las carreras incluidas por el artículo 43 de la ley de Educación Superior. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-1254-2018-310461

Ministerio de Educación. Resolución Ministerial N° 1543/202. Contenidos Curriculares Básicos, Carga Horaria Mínima, Criterios de Intensidad de la Formación Práctica y Estándares para la Acreditación de las carreras de Ingeniería Industrial. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-1543-2021-349956/texto

World Economic Forum. (2025). Future of Jobs Report 2025. Recuperado de https://reports.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_Report_2025.pdf

World Economic Forum. (2023). Future of Jobs Report 2023. Recuperado de https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2023/

Enter the future of work with AI. Recuperado de https://www.pwc.com/us/en/services/ai/ai-and-the-future-of-work.html

Skills for a Resilient Future of Work (2021) de la Organización Internacional del Trabajo (OIT). Recuperado de https://webapps.ilo.org/100/es/story/future/

Empleabilidad: Cinco habilidades clave para evitar la obsolescencia laboral en un mercado orientado a la IA y otras tecnologías. Recuperado de https://www.revistaeconomia.com/empleabilidad-cinco-habilidades-clave-para-evitar-la-obsolescencia-laboral-en-un-mercado-orientado-a-la-ia-y-otras-tecnologias

Un estudio revela que el 90% de las empresas contratan mejor basándose en las habilidades que en los títulos Recuperado de https://www.forbesargentina.com/liderazgo/un-estudio-revela-90-empresas-

Criteria Corp. (2025). 2025 Candidate Experience Report: What job seekers are thinking and feeling in 2025. Criteria Corp. Recuperado de https://www.criteriacorp.com/

Criteria Corp. (2025). 2025–2026 Hiring Benchmark Report: Key insights into how organizations attract, hire, and retain talent. Criteria Corp. Recuperado de https://www.criteriacorp.com/

## Agradecimientos

Este trabajo compila parte de los resultados de los relevamientos realizados en el marco de los proyectos de aprendizaje de la cátedra Gestión de las Personas y de Práctica Profesional Supervisada – cohorte 2025 de la carrera Ingeniería Industrial de la UNCUYO, de los cuales los autores han sido los tutores y guías de los estudiantes para las definiciones de los proyectos, la elaboración de los documentos de recolección de datos y la metodología y análisis de los resultados.

# POWER BI EN LA ENSEÑANZA DE MODELOS DE NEGOCIO: VISUALIZACIÓN Y CONTROL DE GESTIÓN PARA INGENIERÍA INDUSTRIAL

Salguero, Ma. Guadalupe; Cinalli, Marcelo

*Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional UTN-FRSN*
*msalguero@frsn.utn.edu.ar; mcinalli@frsn.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

El estudio de modelos de negocio en entornos complejos requiere integrar herramientas que permitan observar, evaluar y adaptar estrategias organizacionales. La evolución del control de gestión hacia enfoques basados en datos plantea la necesidad de actualizar contenidos y metodologías de enseñanza en la formación de ingenieros, a partir de competencias específicas como “Evaluar, rediseñar y modelar las operaciones e instalaciones de procesos de producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios)” (CE12.1), y la competencia general “Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería” (CG4). Este trabajo presenta una propuesta pedagógica implementada en la cátedra de Control de Gestión de Ingeniería Industrial de la UTN-FRSN, orientada a difundir y fortalecer el uso de Power BI para la construcción y análisis de tableros de comando, respondiendo a los resultados de aprendizaje: “Interpreta modelos de negocios para aplicarlos en la estrategia seleccionada a partir del tipo de organización” (CE12.1) y “Construye tableros de comando para aplicarlos en la gestión utilizando indicadores de las áreas productiva, tecnológica, económico-financiera y de recursos humanos” (CG4). La experiencia se centró en una actividad práctica en la que los estudiantes transformaron y visualizaron datos de un modelo de negocio, utilizando Power BI como herramienta principal. El objetivo fue alinear indicadores clave de desempeño (KPI) con los objetivos estratégicos definidos por los propios estudiantes. Los resultados mostraron que se logró interpretar elementos del modelo de negocio desde una perspectiva estratégica, utilizando indicadores de desempeño adecuados. Además, se valoró positivamente la experiencia y el uso de Power BI. La incorporación de herramientas de análisis de datos en la enseñanza aporta una perspectiva integrada entre la estrategia, la gestión y el análisis, y refuerza la necesidad de formar profesionales con competencias para interpretar indicadores basados en datos confiables y mejorar el control de gestión.

**Palabras Claves:** control de gestión, ciencia de datos, tableros de comando, ingeniería industrial, Power BI.

**ABSTRACT**

The study of business models in complex environments requires the integration of tools that enable organizations to observe, evaluate, and adapt their strategies. The evolution of management control towards data-driven approaches highlights the need to update teaching content and methodologies in engineering education. This must be aligned with specific competencies such as “Evaluate, redesign, and model operations and facilities for the production, distribution, and marketing of products (goods and services) (CE12.1)” and the general competence “Effectively use techniques and tools applied in engineering (CG4)”. This paper presents a pedagogical approach implemented in the Management Control course of the Industrial Engineering program at UTN-FRSN, aimed at promoting the use of Power BI for the construction and analysis of management dashboards. The proposal supports learning outcomes such as “Interprets business models to apply them to the selected strategy based on the type of organization (CE12.1)” and “Builds a management dashboard using indicators from production, technology, financial-economic, and human resources areas (CG4)”. The experience centered on a practical activity in which students transformed and visualized business model data using Power BI as the main tool. The objective was to align key performance indicators (KPIs) with the strategic objectives defined by the students themselves. The results showed that students were able to interpret business model components from a strategic perspective using performance indicators, and they positively evaluated both the experience and the use of Power BI. The incorporation of data analysis tools into

teaching provides an integrated perspective between strategy, operational management, and data interpretation. This reinforces the need to train professionals with skills in analyzing indicators based on reliable data, enabling more effective management control.

**Keywords:** management control, data science, dashboards, industrial engineering, Power BI

Nota 1: El resumen deberá estar ubicado en la primera página del artículo.

El primer punto del artículo “Introducción” deberá comenzar al principio de la segunda página, tal como se muestra en este ejemplo.

Nota 2: Se aconseja utilizar esta plantilla para escribir su Trabajo ya que contiene toda la configuración de formato requerida para la publicación.

## 1. INTRODUCCIÓN

La evolución del control de gestión hacia enfoques basados en datos tiende a actualizar contenidos y metodologías en la formación de ingenieros industriales. En particular, integrar herramientas de inteligencia de negocios - *Business Intelligence (BI)* en la enseñanza de modelos de negocio facilita la observación, evaluación y adaptación de estrategias. La digitalización, la evolución tecnológica y los nuevos desafíos medioambientales, sociales y económicos impulsan la búsqueda de métodos innovadores que no solo mejoren la calidad educativa, sino que también preparen a los futuros ingenieros para adaptarse a entornos en constante cambio (Gallegos et al, 2024).
En la cátedra de Control de Gestión, dictada en quinto año de la carrera Ingeniería Industrial de la de la Facultad Regional San Nicolás (UTN- FRSN) se impulsó el uso de Power BI (PB) como herramienta central para construir tableros de comando, enfatizando competencias específicas CE12.1: "Evaluar, rediseñar y modelar las operaciones e instalaciones de procesos de producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios)" y la competencia general CG4: "Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería" indicadas en Resolución 1908/22 de la UTN donde se define entre otras las Competencias, las Específicas (CE) y las Genéricas (GG) para la carrera Ingeniería Industrial (UTN, Resolución 1908/22). La resolución se ratifica el enfoque de formación experimental y en la práctica, condiciones que serán evaluadas en el marco de acreditación de carreras y nuevos estándares (Cinalli et al, 2024) y al concepto de Moya y Mattio (citados por Gallegos et al, 2023), el ingeniero no sólo debe saber, sino también saber hacer. El saber hacer no surge de la mera adquisición de conocimientos, sino que es el resultado de la puesta en funciones de una compleja estructura de conocimientos, habilidades, destrezas, y otras. que requiere ser reconocida expresamente en el proceso de aprendizaje (Gallegos et al, 2023).
El objetivo de este trabajo es compartir la experiencia pedagógica de uso de Power BI, invitando a los estudiantes a aplicar la herramienta en un caso práctico (real o ficticio). La propuesta consistió en trabajar primero de forma individual y luego en equipo, definiendo misión, visión y objetivos estratégicos. A partir de allí, los estudiantes alinearon indicadores clave de desempeño (KPI) con los objetivos que ellos mismos habían establecido. Posteriormente, construyeron tableros de control en Power BI para analizar los resultados, discutir conclusiones, comparar distintos gráficos —identificando cuáles generaban un mayor impacto visual— y reflexionar en conjunto sobre el proceso de aprendizaje. Para el relevamiento de los datos se basaron en técnicas y herramientas cuali-cuantitativos utilizados por el grupo de investigación de Gestión Innovación y Mejora Continua - (GIMCO UTN FRSN Dpto. Industrial) (Gallegos et al, 2022) y la experiencia de planificación y acción para diseñar una actividad centrada en el estudiante y por competencias en Ingeniería Industrial (Cinalli et al, 2024).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Contexto y diseño de la actividad

La experiencia se llevó a cabo en la asignatura Control de Gestión de la carrera de Ingeniería Industrial en la UTN-FRSN. El propósito fue acercar a los estudiantes a un uso práctico de Power BI como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en entornos organizacionales. El diseño original de la actividad se realizó adaptando las etapas de contextualización, metodología y evaluación respondiendo a las preguntas ¿a quién voy a enseñar?, ¿qué voy a enseñar?, objetivo, ¿cómo quiero enseñar?, descripción de la actividad y ¿cómo voy a evaluar? (Cerrano et al,2017).
Para ello, los estudiantes trabajaron en equipos de proyecto, tomando como punto de partida un modelo de negocio real o ficticio. Bajo la guía de los docentes, cada grupo definió la visión, misión y objetivos estratégicos de la organización elegida, y a partir de ellos estableció un conjunto de indicadores clave de desempeño (KPI) asociados a distintas áreas funcionales. En la fase técnica, los equipos realizaron en Power BI el proceso completo de preparación y modelado de datos, seguido por la construcción de visualizaciones interactivas. Finalmente, integraron estos componentes en un tablero de comando que permitiera analizar la información de manera integral y reflexionar sobre la alineación entre indicadores y objetivos estratégicos.

### 2.2. Instrumentos y procedimiento

Para realizar la experiencia se utilizaron tres tipos de instrumentos:

**Productos técnicos:** cada equipo generó un dataset depurado y un tablero en Power BI (versión de escritorio), evidenciando el dominio de la herramienta y su aplicación a un caso práctico.

**Evaluación formativa:** los docentes realizaron un acompañamiento continuo durante el desarrollo de la práctica, brindando realimentación inmediata en los avances parciales. La actividad culminó con una

defensa final breve, donde cada equipo presentó su tablero y justificó las decisiones de diseño adoptadas.

**Encuesta de percepción:** al finalizar la actividad se administró un cuestionario autogestionado, compuesto por ítems en escala Likert de 1 a 5 y preguntas dicotómicas/múltiple opción. Este instrumento buscó relevar la experiencia subjetiva de los estudiantes en relación con la dificultad, el aprendizaje alcanzado y la percepción de utilidad de Power BI.

### 2.3. Muestra y período de relevamiento

La muestra estuvo conformada por 20 estudiantes que cursaban la asignatura en el primer cuatrimestre correspondiente al año 2025.

En cuanto a los aspectos éticos, la participación fue voluntaria y las respuestas fueron tratadas de manera anónima, considerándose únicamente en análisis agregado, sin posibilidad de identificar a los estudiantes en particular.

### 2.4. Variables e indicadores de encuesta

La encuesta se estructuró en torno a cuatro dimensiones principales, con indicadores específicos:

- **Conocimiento y acceso:** nivel de familiaridad previa con Power BI y percepción sobre su disponibilidad institucional.
- **Dificultad y proceso:** grado de dificultad percibida en el uso de la herramienta, tanto en aspectos generales como en el diseño de los tableros.
- **Aprendizaje y transferencia:** comprensión del concepto de modelos de negocio, motivación hacia el uso de herramientas de business intelligence, capacidad para representar dimensiones mediante KPIs y disposición a utilizar Power BI en el futuro.
- **Resultados del proyecto:** logro de un tablero funcional, definición clara de KPIs, pertinencia en la aplicación al caso trabajado y experiencia de presentar ante los docentes.

### 2.5. Análisis

Se calcularon estadísticas descriptivas (medias, conteos y porcentajes) para las variables de interés. Las respuestas abiertas se revisaron para identificar oportunidades de mejora.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Conocimiento y acceso a la herramienta

Conocimiento de la herramienta por parte de los estudiantes se presenta en el Gráfico 1.




**Gráfico 1 – Conocimiento de la herramienta PB**

Disponibilidad institucional de la herramienta de Power BI entre las ofrecida junto al correo de la facultad, y en el Gráfico 2 se muestra el grado de conocimiento de la disponibilidad para usarla en forma gratuita.




**Gráfico 2 – Disponibilidad de la herramienta PB**

El conocimiento previo es alto, pero existe margen de mejora en la difusión institucional y en la adopción efectiva (muchos conocían el acceso gratuito, pero no lo utilizaban).

### 3.2. Dificultad y proceso de diseño

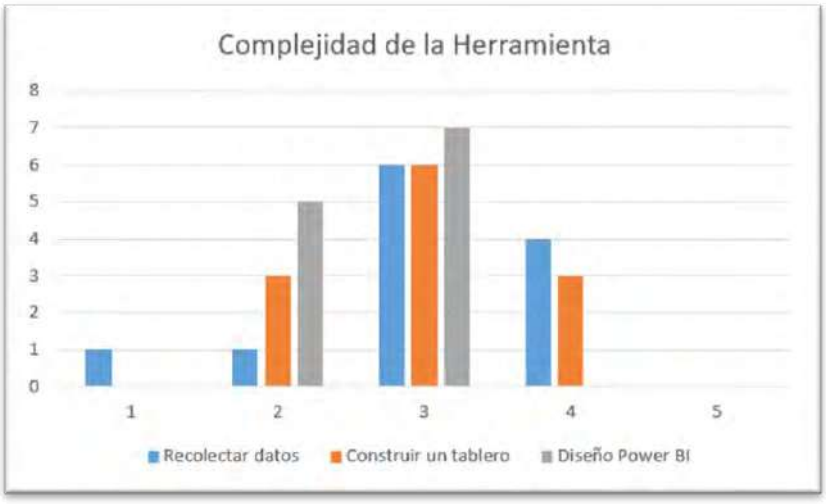



**Gráfico 3 – Complejidad de la herramienta PB**

La complejidad sobre el entendimiento de la herramienta se muestra en el Grafico 3 y es la siguiente:

Dificultad general (1=básico,5=avanzado): media 3,08 (moderada).

Dificultad de diseño del tablero (1=fácil,5=difícil): media 2,58 (baja a moderada).

La curva de aprendizaje fue abordable, con mayor facilidad en el diseño que en aspectos avanzados del modelado.

### 3.3. Productos técnicos y aprendizaje

En este punto se presenta el aprendizaje sobre el producto siendo lo siguiente:

Construyó un tablero funcional: 100%.

Definió KPIs por área: 100%.

Comprensión de modelos de negocio (1–5): media 3,83.

Representación de dimensiones mediante KPIs (1–5): media 4,14.

Motivación hacia el uso de Power BI (1–5): media 4,67.

Valoración global de la enseñanza y de Power BI (1–5): media 4,86.

Usaría Power BI en el futuro: 100%.

Se fortalecen competencias asociadas a interpretación y análisis de modelos de negocio y a la construcción de tableros, con una valoración muy favorable de la propuesta.

### 3.4. Experiencia de presentación y aplicación en casos reales

Experiencia de presentación ante docentes (1–5): media 4,00.

La práctica se aplicó en un caso real: 58,3%.

La defensa fue percibida como positiva, y más de la mitad logró llevar la práctica a un contexto real, potenciando la transferencia.

## 4. DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que Power BI actúa como mediador didáctico entre el diseño del modelo de negocio y su traducción a métricas accionables. La alta motivación y valoración de la herramienta sugiere que su adopción favorece el aprendizaje activo y el vínculo con problemas reales. Asimismo, el 100% de tableros funcionales y la definición universal de KPIs indican que la propuesta es replicable con estudiantes de similar nivel.

Implicancias para competencias: los logros observados son consistentes con CE12.1 (evaluar, rediseñar y modelar operaciones e instalaciones) y CG4 (uso efectivo de técnicas y herramientas), al exigir a los estudiantes el alineamiento de KPIs con objetivos estratégicos y la visualización de resultados.

Limitaciones: (i) tamaño muestral reducido (n=12); (ii) una sola cohorte e institución; (iii) ausencia de grupo control; (iv) sesgo de autopercepción.

Trabajos futuros: (i) diseño pretest–postest para medir ganancia de aprendizaje; (ii) rúbricas estandarizadas para evaluar tableros; (iii) mayor integración con casos reales y datos abiertos; (iv) extensión a otras asignaturas/ carreras.

## 5. CONCLUSIONES

La integración de Power BI en la enseñanza de modelos de negocio facilita la construcción de tableros y la interpretación de indicadores alineados a la estrategia utilizando herramientas que permitan observar, evaluar y adaptar estrategias organizacionales.

La propuesta obtuvo una valoración global excelente (4,86) y alta motivación (4,67), con 100% de tableros funcionales e intención de uso futuro.

Se observan avances en la comprensión de modelos (3,83) y en la representación de dimensiones mediante KPIs (4,14).

Es necesario reforzar la difusión de la disponibilidad institucional de Power BI y promover su uso efectivo.

La actividad contribuye al desarrollo de las competencias CE12.1 y CG4 en Ingeniería Industrial que desde la Catedra de Control de gestión buscó plantear la necesidad de actualizar contenidos y metodologías de enseñanza en la formación de ingenieros, a partir de competencias.

Con esta dinámica de clase, se pudo la competencia general “Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería” (CG4), aplicadas a modelado, bajo un tablero de

comando, el control operaciones de procesos de producción de productos (bienes y servicios)" (CE12.1).

## 6. REFERENCIAS.


UTN CS (2023). Res. 1908. "Diseño Curricular de Ingeniería Industrial". Buenos Aires.

Cerrano, M; Feraboli,L; Gallegos M. (2017) Diseño y desarrollo de un dispositivo lúdico de aprendizaje Publicado en los Anales del X Congreso de Ingeniería Industrial (X COINI).

Gallegos, M. L., Cinalli, M., & Hetze, V. (2022). "Herramientas para relevar competencias en la Práctica Profesional Supervisada de Ingeniería Industrial", 6° Congreso Argentino de Ingeniería (CADI) y 12° Congreso Argentino de Enseñanza de. Buenos Aires, Argentina. Publicado Memorias del Encuentro Argentino de Ingeniería: edición 2022. p. 128-133, ISBN 978-987-4050-08-3

Gallegos, M. L; Cinalli, M.; Hetze, V., Salguero, M. G.; Parra, P. (2023) Experiencia intercátedra: de la simulación a la planta. XVI COINI Industrial 2023. San Nicolás. Bs. As. Libro de Memorias XVI COINI 2023 https://doi.org/10.33414/ajea.1316.2023

Cinalli, Marcelo; Gallegos, M. Laura; Hetze, Vanesa; Salguero, M. Guadalupe (2023) Planificación, implementación y acción de un diseño lúdico intercátedra, 3er. Congreso en Innovación y Creatividad Educativa en Enseñanza Tecnológica (CICE). 28, 29 y 30 de agosto 2024, UTN Facultad Regional Chubut. Puerto Madryn. Argentina. Disponible en: https://ria.utn.edu.ar/items/72c253e3-b331-45d4-9591-aaea767db2c3

Gallegos, M. L., Cerrano M. L, Cinalli, M., & Gómez, D. (2024). "Competencias y caracterización docente: Gestión docente para la formación de ingenieros", COINI 2024, UTN-FRLP, La Plata, Pcia de Buenos Aires.

Gallegos, M. Laura; Cinalli, Marcelo; Hetze, Vanesa; Vecchi, Carlos - Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional San Nicolás (UTN-FRSN), Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste (FCA-UNNE) (2024) Experiencia Interfacultades para la Formación por Competencias Genéricas y Específicas de la Ingeniería Industrial, XVII COINI 2024, UTN FRLP, La Plata, Buenos Aires, Argentina. ISBN en trámite.

# CARACTERIZACIÓN DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL: DESAFÍOS, MOTIVACIONES Y LÍNEAS DE INTERVENCIÓN

Boychenko, Darina

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora.*

*dboychenko@ingenieria.unlz.edu.ar*

**RESUMEN**

Este trabajo analiza el perfil del estudiantado de Ingeniería Industrial en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (FI-UNLZ), con el objetivo de comprender las trayectorias académicas, identificar factores asociados al desgranamiento y proponer estrategias institucionales de mejora. A partir de una encuesta estructurada respondida por 221 estudiantes (17,4 % de la matrícula 2024), se relevaron variables demográficas, motivacionales, laborales y académicas. El análisis permitió identificar tres perfiles diferenciados: estudiantes iniciales (jóvenes, sin empleo, con alta dependencia de la presencialidad), intermedios (con empleo parcial o completo, que demandan flexibilidad) y avanzados (con empleo en ingeniería, trayectorias no lineales y alta autonomía). Los resultados muestran que el desgranamiento no es homogéneo, sino que responde a momentos específicos de la trayectoria y a condiciones personales, sociales y pedagógicas. Se propone avanzar hacia un modelo de acompañamiento diferenciado, basado en herramientas de experiencia de usuario (UX) y propuesta de valor (VPC), que permita diseñar soluciones ajustadas a las necesidades reales de cada perfil. El estudio se apoya en referencias teóricas y metodológicas actuales, y plantea líneas futuras de investigación con enfoque mixto.

**Palabras Claves:** Desgranamiento, Trayectorias académicas, Ingeniería Industrial, Perfiles estudiantiles, Retención universitaria

**ABSTRACT**

This study analyzes the student profile of the Industrial Engineering program at the Faculty of Engineering of the National University of Lomas de Zamora (FI-UNLZ), aiming to understand academic trajectories, identify factors associated with dropout, and propose institutional improvement strategies. Based on a structured survey completed by 221 students (17.4% of the 2024 enrollment), the study collected demographic, motivational, occupational, and academic data. The analysis identified three distinct profiles: initial students (young, unemployed, highly dependent on in-person learning), intermediate students (partially or fully employed, demanding flexibility), and advanced students (employed in engineering, with non-linear and autonomous trajectories). Findings reveal that dropout is not homogeneous but linked to specific stages and contextual factors. The study proposes a differentiated support model using User Experience (UX) and Value Proposition Canvas (VPC) tools to design tailored solutions for each profile. The research is grounded in current theoretical and methodological frameworks and outlines future lines of inquiry using mixed methods.

**Keywords:** Dropout, Academic trajectories, Industrial Engineering, Student profiles, University retention

## 1. INTRODUCCIÓN

La problemática del desgranamiento y la deserción en carreras de ingeniería ha sido objeto de múltiples investigaciones en el ámbito de la educación superior, tanto en Argentina como en otros países. Diversos estudios han señalado que los primeros años de cursada concentran los mayores índices de abandono, lo que plantea desafíos urgentes para las instituciones universitarias en términos de retención, acompañamiento y adecuación curricular.

En el caso de la Facultad Regional Villa María de la UTN, Rosso et al. (2012) identificaron que las asignaturas con mayor índice de desgranamiento eran Álgebra y Geometría Analítica, Análisis Matemático I y Física I, todas pertenecientes al área de formación básica homogénea. Los autores advierten que "la organización tradicional de estas materias, con escasa articulación metodológica y pedagógica, contribuye a la desvinculación temprana de los estudiantes" (p. 3). Esta situación se repite en otras facultades de ingeniería del país, como lo demuestra el estudio de Echazarreta et al. (2016) en la UTN Concepción del Uruguay, donde se reporta un 60% de desgranamiento en los dos primeros años de cursada.

Un aporte relevante desde la perspectiva estudiantil lo ofrece el trabajo de García, González y Zanfrillo (2011), quienes analizaron el desgranamiento en carreras de ingeniería en función de las percepciones de los propios alumnos. En su estudio, los autores identifican que las principales causas del retraso académico se vinculan con la falta de orientación vocacional, la escasa articulación entre el nivel medio y el universitario, y la dificultad para adaptarse a las exigencias de las materias básicas. Los estudiantes señalaron que "el ritmo de cursada, la carga horaria y la modalidad de evaluación generan un impacto negativo en la continuidad de los estudios" (p. 5). Este enfoque resulta especialmente valioso para comprender el fenómeno desde la experiencia directa de quienes transitan la carrera, y se complementa con los modelos explicativos propuestos por Leone et al. (2014) y las caracterizaciones de trayectorias académicas desarrolladas por Moreno et al. (2020).

Desde una perspectiva metodológica, Leone et al. (2014) proponen modelos de simulación para explicar el ritmo de avance en carreras de ingeniería. Su segundo modelo, que reconoce la existencia de dos grupos diferenciados de estudiantes según su capacidad de adaptación al sistema universitario, logra reproducir con mayor precisión la distribución real de aprobaciones en primer año. Este enfoque permite pensar en estrategias diferenciadas de intervención, orientadas a los estudiantes con menor adaptación.

En la Universidad Nacional de Jujuy, Lamas et al. (2017) abordan el desgranamiento temprano desde la perspectiva de los factores cognitivos y académicos, destacando la necesidad de incorporar tecnologías educativas y enfoques pedagógicos flexibles. Los autores señalan que "el rendimiento académico está estrechamente vinculado con el estilo de aprendizaje y la capacidad de adaptación al entorno universitario" (p. 1141), lo que refuerza la importancia de caracterizar los perfiles estudiantiles.

Moreno, Chiecher y Paoloni (2020) profundizan en la relación entre trayectorias académicas y estrategias de aprendizaje. En su estudio con ingresantes a carreras de ingeniería, encuentran que los estudiantes con rendimiento alto utilizan con mayor frecuencia estrategias metacognitivas y de regulación de recursos, mientras que aquellos con bajo rendimiento tienden a incrementar el tiempo de estudio sin modificar sus hábitos. "El tiempo aparece vinculado a la planificación y la búsqueda de estrategias efectivas en los estudiantes de rendimiento alto" (p. 8), lo que sugiere que no basta con estudiar más, sino que es necesario estudiar mejor.

En otro trabajo, Moreno et al. (2019) analizan las metas académicas de estudiantes de ingeniería cinco años después de su ingreso. Los resultados muestran que quienes sostienen metas de aprendizaje desde el inicio tienden a completar la carrera en tiempo teórico, mientras que quienes priorizan evitar el fracaso o salvar la autoestima presentan mayores demoras. Esta distinción resulta clave para comprender las trayectorias reales y diseñar intervenciones pedagógicas más ajustadas.

El estudio de López-Cózar-Navarro et al. (2020) en la Universidad Politécnica de Madrid aporta una mirada complementaria al analizar la intención de abandono en función de variables como la motivación de ingreso, el orden de preferencia en la inscripción y el tipo de institución de procedencia. Los autores concluyen que "la elección vocacional y el acceso por primera opción se asocian con menores tasas de abandono" (p. 87), lo que refuerza la importancia de conocer las motivaciones y expectativas de los estudiantes.

En cuanto a las condiciones de ingreso y permanencia, el trabajo de Echazarreta et al. (2016) destaca que muchos estudiantes provienen de bachilleratos sin orientación técnica, lo que genera dificultades en el abordaje de contenidos específicos. Además, se observa que la mayoría no trabaja durante los

primeros años, pero enfrenta desafíos de organización y adaptación al ritmo universitario. Estos hallazgos coinciden con los de Moreno et al. (2020), quienes señalan que “la falta de herramientas para enfrentar el estudio universitario es una de las principales causas de desgranamiento” (p. 150).

Como línea futura, algunos estudios recientes han comenzado a aplicar enfoques de experiencia de usuario (User Experience, UX) y propuesta de valor (Value Proposition Canvas, VPC) en el ámbito educativo. Harianto y Leoparjo (2022) utilizaron el VPC para rediseñar el currículo de una carrera de negocios culinarios en Indonesia, identificando los “*pains*” y “*gains*” de los estudiantes y proponiendo soluciones adaptadas. Moreta y Said-Hung (2020), por su parte, realizaron un análisis bibliométrico sobre UX en educación, destacando su potencial para mejorar la retención y la satisfacción estudiantil. Si bien estos enfoques aún no han sido aplicados sistemáticamente en carreras de ingeniería en Argentina, ofrecen herramientas prometedoras para el diseño de propuestas pedagógicas centradas en el estudiante.

En este contexto, el presente trabajo se propone caracterizar los perfiles estudiantiles de Ingeniería Industrial en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (FI-UNLZ), a partir de los resultados de una encuesta aplicada a estudiantes de distintas etapas de la carrera. Los objetivos específicos son:

- Identificar las motivaciones, intereses y expectativas de los estudiantes.
- Analizar sus condiciones laborales, habilidades tecnológicas y preferencias de aprendizaje.
- Detectar las principales dificultades y demandas de apoyo académico.
- Proponer líneas de intervención institucional basadas en la caracterización de perfiles.

Se espera que los resultados contribuyan a mejorar la experiencia educativa, reducir el desgranamiento y orientar futuras estrategias de acompañamiento y rediseño curricular.

## 2. PROBLEMÁTICA A ABORDAR

La Facultad de Ingeniería enfrenta una problemática persistente vinculada al desgranamiento estudiantil y a las bajas tasas de egreso. Este fenómeno compromete la eficacia del sistema educativo superior al generar una brecha significativa entre la cantidad de estudiantes que ingresan a la carrera y aquellos que logran culminarla. La magnitud del problema no solo afecta la trayectoria académica individual, sino también la capacidad institucional para formar profesionales que respondan a las demandas sociales y productivas.

El análisis longitudinal de la matrícula, presentado en la Tabla 1, confirma la asimetría entre los procesos de ingreso, retención y egreso. En 2024, se registraron 1271 estudiantes, con una tasa de retención del 82% y de egreso del 4%. En 2023, con 1354 estudiantes, la retención se ubicó en el 77% y el egreso en el 3%. En años previos, como 2019, se observa una dinámica similar: 1008 estudiantes, con 51% de retención y 3% de egreso. Estos valores reflejan que, a pesar de que la institución logra atraer y retener a una parte significativa de los estudiantes en las primeras etapas, las trayectorias académicas se interrumpen antes de alcanzar la graduación.

La baja tasa de egreso resulta particularmente crítica si se la contrasta con los niveles de desgranamiento. En 2022, por ejemplo, con un total de 1550 estudiantes, la tasa de desgranamiento alcanzó el 35 %, mientras que el egreso fue de 4 %. Este desbalance muestra que el desafío principal no radica únicamente en la captación de nuevos inscriptos, sino en la consolidación de mecanismos que permitan sostener y acompañar a los estudiantes hasta la finalización de la carrera. Tal como advierten García, González y Zanfrillo (2011), el ritmo de cursada, la carga horaria y la modalidad de evaluación generan un impacto negativo en la continuidad de los estudios, especialmente cuando no se contemplan las condiciones reales de los estudiantes ni se articulan adecuadamente los contenidos con el nivel medio.

*Tabla 1. Indicadores de comportamiento de cohortes*

| Año | Estudiantes | Nuevos Inscriptos | Reinscriptos | Egresados | Tasa reinscriptos | Tasa desgranamiento | Tasa egreso |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2024 | 1271 | 228 | 1043 | 53 | 82% | 23% | 4% |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2023 | 1354 | 311 | 1043 | 44 | 77% | 33% | 3% |
| 2022 | 1550 | 480 | 1070 | 56 | 69% | 35% | 4% |
| 2021 | 1636 | 424 | 1212 | 40 | 74% | -23% | 2% |
| 2020 | 983 | 313 | 670 | 0 | 68% | 34% | 0% |
| 2019 | 1008 | 490 | 518 | 34 | 51% | 45% | 3% |
| 2018 | 935 | 476 | 459 | 18 | 49% | 33% | 2% |
| 2017 | 682 | 269 | 413 | 7 | 61% | 43% | 1% |
| 2016 | 719 | 309 | 410 | 38 | 57% | 53% | 5% |

Además, los datos revelan que el comportamiento de las cohortes no es uniforme en el tiempo. El caso de 2021 constituye un valor atípico debido a la reincorporación de estudiantes tras la pandemia, lo que alteró las tasas de retención y desgranamiento. Este hecho expone la sensibilidad de los indicadores institucionales frente a contextos externos y la necesidad de contar con políticas de acompañamiento que contemplen factores sociales, económicos y sanitarios que inciden en la continuidad académica. En línea con lo planteado por Echazarreta et al. (2016), es imprescindible considerar las características demográficas, socioeconómicas y académicas de los estudiantes, ya que estas condicionan fuertemente su permanencia y rendimiento.

El gráfico que acompaña esta tabla (Figura 1) ilustra la dinámica de los valores a lo largo del período 2016–2024. Se observa un marcado aumento en la cantidad de reinscriptos, lo cual indica que la capacidad de la institución para mantener a sus estudiantes ha ido en aumento. La cantidad de egresados, por otro lado, muestra una gran variabilidad hasta el año 2020 para luego mantenerse consistentemente en valores bajos, lo que resalta la dificultad persistente en el proceso de graduación.




*Figura 1. Indicadores de comportamiento de cohortes*

Este patrón se vincula con lo observado por Leone et al. (2014), quienes demostraron que las cohortes de estudiantes tienden a dividirse en dos grupos: uno con alta adaptación al sistema educativo y otro con dificultades persistentes. La distribución bimodal en el rendimiento académico, especialmente en el primer año, sugiere que no todos los estudiantes enfrentan las mismas barreras ni responden de igual manera a las exigencias curriculares. Por ello, resulta necesario diseñar estrategias diferenciadas de intervención que reconozcan esta heterogeneidad.

Asimismo, Moreno et al. (2020) sostienen que las trayectorias académicas reales se ven atravesadas por factores personales, institucionales y pedagógicos, y que la falta de estrategias de aprendizaje efectivas contribuye al desgranamiento. En su estudio, los estudiantes con bajo rendimiento reconocen

haber incrementado el tiempo de estudio, pero sin modificar sus hábitos ni adoptar herramientas metacognitivas. Esto refuerza la idea de que el acompañamiento académico debe ir más allá del refuerzo de contenidos y apuntar al desarrollo de competencias transversales.

En conclusión, el análisis de los datos revela que el principal desafío de la Facultad de Ingeniería radica en la optimización de la progresión académica y el acompañamiento estudiantil. La alta tasa de desgranamiento y la baja tasa de egreso sugieren una discontinuidad en las trayectorias que va más allá del simple ingreso. Esto evidencia la urgencia de implementar estrategias pedagógicas y organizacionales que fortalezcan la permanencia, mejoren la culminación de los estudios y respondan de manera contextualizada a los perfiles diversos de los estudiantes.

### 2.1 Nota metodológica sobre el cálculo de indicadores

Para interpretar correctamente los indicadores presentados en la Tabla 1 y la Figura 1, es necesario explicitar la forma en que fueron calculadas las tasas de reinscripción, desgranamiento y egreso. Estos indicadores permiten analizar la dinámica de las cohortes y evaluar el desempeño institucional en términos de permanencia y finalización de estudios.

- Tasa de reinscriptos: se calcula dividiendo la cantidad de estudiantes reinscriptos en un año determinado por el total de estudiantes registrados en ese mismo año. Este indicador refleja la proporción de estudiantes que continúan su trayectoria académica dentro de la institución.
- Tasa de desgranamiento: se obtiene restando la cantidad de inscriptos del año en curso a la cantidad total de estudiantes del año anterior, y dividiendo ese resultado por la cantidad de estudiantes del año anterior. Esta fórmula permite estimar la proporción de estudiantes que interrumpieron su trayectoria académica entre un año y otro.
- Tasa de egreso: se calcula dividiendo la cantidad de egresados en un año determinado por el total de estudiantes registrados en ese mismo año. Este indicador expresa la proporción de estudiantes que lograron completar la carrera en relación al universo total de estudiantes activos.

## 3. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DEL PERFIL DEL ESTUDIANTE DE INGENIERÍA INDUSTRIAL EN LA FI-UNLZ.

En el marco de los estudios sobre desgranamiento y deserción temprana en las carreras de ingeniería, se diseñó una encuesta estructurada con el propósito de caracterizar al estudiantado de Ingeniería Industrial de la FI-UNLZ. El instrumento fue respondido por 221 estudiantes, equivalentes al 17,4 % de la matrícula total de 1271 alumnos en 2024, lo que otorga representatividad estadística a los resultados. El relevamiento incluyó variables demográficas, motivacionales, laborales, académicas y de experiencia formativa, con el fin de identificar barreras de permanencia y factores que orientan las trayectorias.

El diseño de la encuesta se basó en principios de investigación educativa aplicada, orientados a la caracterización de perfiles estudiantiles y la detección de factores asociados a la permanencia, el rendimiento y la deserción. Se adoptó un enfoque no experimental de tipo transeccional-descriptivo, adecuado para recolectar datos sobre características, opiniones y comportamientos de una población en un momento determinado (Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

Para la construcción del instrumento se tomaron como referencia los lineamientos metodológicos utilizados por Moreno, Chiecher y Paoloni (2020), quienes desarrollaron un cuestionario estructurado en secciones temáticas para evaluar estrategias de aprendizaje, motivaciones y condiciones personales. Su instrumento, validado por jueces expertos, incluye ítems sobre planificación, regulación del esfuerzo, uso de recursos y preferencias de estudio, lo que sirvió como modelo para la construcción de dimensiones similares en esta encuesta.

También se consideró el trabajo de García, González y Zanfrillo (2011), que indaga en las percepciones estudiantiles sobre el desgranamiento en ingeniería mediante encuestas y entrevistas. Su enfoque cualitativo complementa el análisis cuantitativo y permite interpretar los datos desde la experiencia directa de quienes transitan la carrera.

En cuanto a la estructura de la encuesta, se siguieron recomendaciones de Bossolasco, Chiecher y Dos Santos (2019), quienes proponen organizar los instrumentos en secciones que aborden: datos personales, trayectoria académica, motivaciones, condiciones de estudio, dificultades percibidas y expectativas futuras. Esta organización facilita el análisis por dimensiones y el cruce de variables.

Además, se incorporaron elementos del enfoque de diseño centrado en el usuario (UX) y del Value Proposition Canvas (Osterwalder et al., 2014), como línea futura de trabajo. Si bien no fueron aplicados directamente en esta etapa, sus categorías —como "*jobs*", "*pains*" y "*gains*"— inspiraron la inclusión de preguntas sobre frustraciones, motivaciones y recursos deseados, en sintonía con lo planteado por Harianto y Leoparjo (2022) y Moreta y Said-Hung (2020).

La encuesta fue administrada de forma digital, garantizando anonimato y voluntariedad. Los datos fueron procesados mediante análisis estadístico descriptivo y categorización temática, lo que permitió construir cuadros interpretativos y realizar inferencias vinculadas a los objetivos del estudio.

A continuación se presentan los principales resultados organizados en cinco dimensiones: caracterización demográfica y trayectorias académicas; motivaciones, áreas de interés y planes futuros; condición laboral y experiencia profesional; modalidad de aprendizaje y dificultades; y recursos demandados y equilibrio vida–estudio.

### 3.1. Caracterización demográfica y trayectorias académicas.

La edad promedio de los encuestados es de 25,6 años, con un rango que oscila entre 18 y 55 años, lo que evidencia trayectorias heterogéneas (véase Tabla 2). La distribución etaria se organiza en tres grupos principales:

- 18–23 años (51 %): mayormente estudiantes recién egresados del nivel secundario, con predominio femenino.
- 24–30 años (42 %): estudiantes en etapa intermedia, con creciente inserción laboral.
- Más de 30 años (7 %): minoría vinculada a reingresos o procesos de reconversión profesional.

*Tabla 2. Estadísticas de edad*

| N | Media | Mediana | Moda | Desv. Típica | Min | Max |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 221 | 25.6 | 24 | 20 | 7.02 | 18 | 55 |

La procedencia geográfica confirma la vinculación territorial de la carrera: el 71,5 % reside en Esteban Echeverría, Lomas de Zamora o Almirante Brown, lo que refuerza el carácter regional de la oferta académica.

En cuanto al género, las mujeres representan el 42,1 % de la muestra, proporción superior al promedio nacional de participación femenina en carreras de ingeniería (≈25 %, según datos de SPU, 2023). Su presencia se concentra en los primeros años, con una media de edad más baja (24 años). Los varones predominan en las etapas intermedias y avanzadas, con trayectorias más diversas y extensas.

La distribución por etapa de la carrera reproduce la pirámide típica de las ingenierías: 46,6 % en los dos primeros años, 34,4 % en los intermedios y 19 % en el tramo final. Esta estructura refleja el ingreso masivo inicial y las dificultades de permanencia, en línea con lo observado por Echazarreta et al. (2016) y López-Cózar-Navarro et al. (2020).

En síntesis, la caracterización demográfica muestra diversidad etaria y de género, con fuerte concentración territorial y progresión académica asociada tanto a oportunidades de inserción temprana como a obstáculos de permanencia. El cruce de edad y género sugiere que las mujeres ingresan más temprano y en mayor proporción, mientras que los varones tienden a sostener su continuidad hacia las etapas avanzadas. Tal como advierten García et al. (2011), las trayectorias no son lineales ni homogéneas, y requieren políticas diferenciadas de acompañamiento.

### 3.2. Motivaciones, áreas de interés y planes futuros.

La elección de la carrera se vincula principalmente con intereses en gestión y administración (38 %), procesos productivos (23 %) y vocación industrial (22 %). Factores externos, como recomendaciones familiares o de pares, explican el 9 %, mientras que un 8 % se orienta hacia áreas específicas como mecatrónica, economía o innovación.

Las áreas de interés académico-profesional confirman la orientación multidisciplinaria de la Ingeniería Industrial:

- Gestión de la producción y optimización de procesos: 68 %
- Calidad, mejora continua y logística: 58 %
- Innovación, tecnología y sostenibilidad: 42 %

La mayoría de los estudiantes selecciona más de un área, lo que revela una visión integral de la disciplina y una expectativa de formación versátil.

Respecto a los planes futuros:

- 85 % proyecta insertarse en empresas industriales
- 60 % desea continuar estudios de posgrado
- 40 % aspira a emprender, especialmente varones jóvenes
- 15 % permanece indeciso, concentrado en las etapas iniciales

Este perfil refleja estudiantes orientados a la gestión y los procesos técnicos, con expectativas de crecimiento profesional, interés por la formación continua y apertura hacia el emprendimiento. Coincide con los hallazgos de Moreno et al. (2019), quienes vinculan metas de aprendizaje con trayectorias exitosas. La indecisión en etapas iniciales refuerza la necesidad de orientación vocacional temprana, como sugieren García et al. (2011).

### 3.3. Condición laboral y experiencia profesional.

La inserción laboral se intensifica a medida que avanza la trayectoria académica. En los primeros años, el 18,1 % trabaja a tiempo completo en ingeniería; en las etapas intermedias, el porcentaje asciende al 36,6 %; y en el tramo final alcanza el 66,7 %.

*Tabla 3. Trabajo a tiempo completo en ingeniería por etapa*

| Etapa | Total estudiantes | % en ingeniería |
|---|---|---|
| 1º/2º año | 94 | 18,1% |
| 3º/4º año | 82 | 36,6% |
| Último año | 45 | 66,7% |

Estos datos reflejan que la integración temprana al ámbito laboral en áreas de ingeniería es todavía limitada, pero se expande de manera progresiva a medida que los estudiantes avanzan en su formación. El incremento sostenido sugiere que la experiencia profesional no solo acompaña, sino que potencia el desarrollo académico, al facilitar la aplicación práctica de conocimientos y favorecer la construcción de trayectorias más sólidas.

En conclusión, la experiencia profesional se integra de manera progresiva con la académica, consolidando la carrera como un puente hacia el mercado de trabajo. Este patrón confirma lo señalado por Lamas et al. (2017), quienes destacan que la articulación entre teoría y práctica fortalece la permanencia y el rendimiento.

### 3.4. Modalidad de aprendizaje y dificultades.

Las preferencias de aprendizaje evolucionan según la etapa:

- Inicial: presencialidad (≈50 %), asociada a la necesidad de acompañamiento.

- Intermedia: virtualidad (24 %) y proyectos prácticos, en relación con la compatibilización con el empleo.
- Avanzada: proyectos prácticos (29 %) y autonomía (12 %), en consonancia con la cercanía al ejercicio profesional.

Las dificultades también varían: en los tramos iniciales predominan problemas de organización (25 %) y falta de tiempo (30 %); en los intermedios, déficit de práctica real (30 %) y falta de tiempo (20 %); en los avanzados, se mantienen estas limitaciones y se suma la presión de los proyectos finales.

*Tabla 4. Dificultades por etapa*

| Etapa | Falta práctica | Falta de tiempo | Organización | Complejidad |
|---|---|---|---|---|
| Inicial | 15% | 30% | 25% | 12% |
| Intermedia | 30% | 20% | 15% | 8% |
| Avanzada | 25% | 25% | 15% | 8% |

El análisis evidencia la necesidad de un modelo pedagógico escalonado, capaz de responder a las demandas de acompañamiento inicial y de formación práctica y flexible en etapas avanzadas. Tal como plantean Moreno et al. (2020), las estrategias de aprendizaje deben adaptarse a las condiciones reales de los estudiantes para evitar el desgranamiento.

### 3.5. Recursos demandados y equilibrio vida-estudio.

Los recursos priorizados son la orientación profesional (48 %), el acceso a materiales prácticos (28 %) y el apoyo académico mediante tutorías (19 %). En cuanto a los formatos de apoyo, los estudiantes valoran en primer lugar la mentoría docente (45 %), seguida por charlas con profesionales de la industria (29 %) y tutorías entre pares (21 %).

El 89 % considera fundamental mantener un equilibrio entre estudio y vida personal, aunque solo la mitad lo logra. Un 21 % señala dificultades significativas, especialmente quienes trabajan a tiempo completo.

Los resultados indican una demanda de acompañamiento integral que combine guía docente, vinculación con el sector productivo y apoyo académico, al mismo tiempo que se reconozca el equilibrio vida–estudio como una condición central para la permanencia.

## 4. CONCLUSIONES.

El análisis del perfil del estudiante de Ingeniería Industrial en la FI-UNLZ permitió identificar tres perfiles diferenciados, que reflejan la heterogeneidad, evolución y complejidad de las trayectorias académicas a lo largo de la carrera. Esta segmentación no solo responde a variables demográficas y laborales, sino también a patrones motivacionales, preferencias pedagógicas y demandas institucionales específicas.

Perfil 1: Estudiante Inicial

- Edad: 18–23 años
- Género predominante: femenino
- Condición laboral: sin empleo o con trabajos externos a la ingeniería

Este grupo presenta alta dependencia de la presencialidad, dificultades para organizarse y adaptarse a la vida universitaria, y una fuerte necesidad de acompañamiento académico. Sus motivaciones se centran en la gestión y los procesos productivos, y valoran especialmente el contacto temprano con la práctica profesional. La demanda de tutorías, orientación vocacional y materiales accesibles es recurrente.

Este perfil coincide con lo observado por García, González y Zanfrillo (2011), quienes identificaron que los estudiantes en etapas iniciales enfrentan barreras vinculadas a la transición entre el nivel medio y el universitario, la falta de orientación vocacional y la escasa articulación pedagógica. Asimismo, Moreno et al. (2020) señalan que en los primeros años predominan estrategias de estudio poco efectivas, lo que refuerza la necesidad de intervenciones tempranas.

Perfil 2: Estudiante Intermedio

- Edad: 24–30 años
- Género predominante: masculino
- Condición laboral: empleo parcial o completo

Este grupo combina estudio y empleo, enfrentando limitaciones de tiempo y demandas de flexibilidad académica. Muestra preferencia por modalidades virtuales, proyectos prácticos y experiencias aplicadas. Su motivación se orienta a la aplicación industrial de conocimientos, y demanda entornos formativos que integren teoría y práctica.

La coexistencia entre trabajo y estudio, y la necesidad de compatibilización, fueron destacadas por López-Cózar-Navarro et al. (2020), quienes advierten que las condiciones laborales inciden directamente en la intención de abandono. Lamas et al. (2017) también subrayan que la incorporación de tecnologías educativas y metodologías flexibles puede mejorar la permanencia en este segmento.

Perfil 3: Estudiante Avanzado

- Edad: 30+ años
- Género predominante: masculino
- Condición laboral: empleo en ingeniería

Este perfil presenta trayectorias prolongadas y no lineales, alta autonomía y preferencia por modalidades prácticas y autónomas. Su interés se centra en innovación, sostenibilidad y áreas estratégicas de la disciplina. Valoran la consolidación profesional, la formación de posgrado y el equilibrio entre trabajo, vida personal y estudio.

Este patrón se vincula con lo planteado por Leone et al. (2014), quienes identifican que los estudiantes con mayor adaptación al sistema universitario tienden a sostener trayectorias más estables, aunque no necesariamente lineales. La búsqueda de formación continua y especialización también se relaciona con las metas de aprendizaje descritas por Moreno et al. (2019).

### 4.1 Implicancias institucionales

El análisis evidencia que el desgranamiento no es homogéneo, sino que se relaciona con distintos momentos de la trayectoria académica y con necesidades específicas de cada grupo. Esta heterogeneidad refuerza la necesidad de diseñar estrategias diferenciadas de acompañamiento, que contemplen tanto el ingreso como la progresión y el egreso.

Los hallazgos constituyen la base para la siguiente etapa de la investigación, orientada a construir perfiles de estudiantes mediante herramientas de experiencia de usuario (UX). La combinación de técnicas como personas y el Value Proposition Canvas permitirá evaluar el grado de encaje entre las expectativas y dificultades de cada perfil y la propuesta académica institucional, orientando el diseño de soluciones pedagógicas, organizacionales y tecnológicas más ajustadas.

### 4.2 Limitaciones y líneas futuras

Entre las principales limitaciones del estudio se reconoce el carácter exploratorio del análisis, la necesidad de ampliar la muestra hacia cohortes más recientes y diversas, y la importancia de profundizar en variables contextuales, incluyendo condiciones socioeconómicas, trayectorias laborales y modalidades de cursada.

Asimismo, resulta relevante incorporar metodologías mixtas que integren datos cuantitativos con entrevistas y grupos focales, con el objetivo de enriquecer la comprensión de los factores que inciden en la permanencia y el egreso. Esta triangulación metodológica permitiría validar los perfiles construidos y generar propuestas institucionales basadas en evidencia.

En síntesis, la discusión de resultados confirma que la caracterización de perfiles estudiantiles es una herramienta clave para comprender el desgranamiento y orientar políticas de mejora. La articulación entre datos empíricos, marcos teóricos y herramientas de diseño centrado en el usuario ofrece un camino prometedor para fortalecer la experiencia educativa en Ingeniería Industrial.

## 5. REFERENCIAS.

De Oleo Moreta, C., & Said-Hung, E. (2020). La producción científica en el estudio de experiencia de usuario en educación: caso Web of Science y Scopus. *Transinformação, 32*, e200009. Recuperado de https://periodicos.puc-campinas.edu.br/transinfo/article/view/5868

Echazarreta, D. R., Haudemand, N. Y., & Gianera, J. E. (2016). Desgranamiento y deserción de alumnos en los dos primeros años de las carreras de ingeniería. En *III Congreso Argentino de Ingeniería & IX Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería, Resistencia, Chaco, Argentina*. Universidad Tecnológica Nacional. http://hdl.handle.net/20.500.12272/2140

García, J. C., González, M. L., & Zanfrillo, A. I. (2011). *Desgranamiento universitario: perspectiva estudiantil en Ingeniería* [Comunicación presentada en congreso]. *XI Colóquio Internacional sobre Gestão Universitária na América do Sul*, Florianópolis, Brasil, 7–9 de diciembre de 2011.

Harianto, E., & Leoparjo, F. (2022). The value proposition concept in higher education: How to build hybrid curricula Universitas Ciputra Culinary Business. *International Journal of Economics, Business and Accounting Research (IJEBAR), 6*(1), 587–596. https://doi.org/10.29040/ijebar.v6i1.3056

Lamas, R. D., García, V. A., Torres, M., & Pérez Ibarra, M. (2017). Desgranamiento temprano en materias de primer año en las carreras de la Facultad de Ingeniería de la UNJu: Evaluación de la influencia de factores cognitivos. En *XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2017, ITBA, Buenos Aires)* (pp. 1139–1144). Red de Universidades con Carreras en Informática (RedUNCI). ISBN 978-987-42-5143-5.

Leone, L., Veizaga, K., Conforte, J., & Zanazzi, J. L. (2014). Modelos para explicar el desgranamiento en una carrera de Ingeniería. En *XLIII Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (43JAIIO) – XII Simposio Argentino de Investigación Operativa (SIO)* (pp. 25–32). Sociedad Argentina de Informática e Investigación Operativa (SADIO). ISSN 1850-2865.

López-Cózar-Navarro, C., Benito-Hernández, S., & Priede-Bergamini, T. (2020). Un análisis exploratorio de los factores que inciden en el abandono universitario en titulaciones de ingeniería. *REDU. Revista de Docencia Universitaria, 18*(2), 81–96. https://doi.org/10.4995/redu.2020.13294

Moreno, J. E., Chiecher, A. C., & Paoloni, P. V. R. (2019). Los estudiantes universitarios y sus metas académicas: Implicancias en el logro y retraso de los estudios. *Ciencia, Docencia y Tecnología, 30*(59), 1–25. Universidad Nacional de Entre Ríos. https://doi.org/10.33255/3059/319

Moreno, J. E., Chiecher, A. C., & Paoloni, P. V. R. (2020). Trayectorias de ingresantes universitarios y estrategias de aprendizaje: sus implicancias en el rendimiento académico [Freshman university student approaches to learning strategies: Impact on academic performance]. *Educación, Universidad de Costa Rica, Facultad de Educación, 44*(2), 1–19. https://doi.org/10.15517/revedu.v44i2.42640

Rosso, M., Peralta, J., Aimar, J., Vaira, S., & Oddino, S. (2014). *Desgranamiento temprano y diseño curricular en carreras de ingeniería: El caso de la Facultad Regional Villa María de la UTN*. En *V Jornadas de Educación Matemática*. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Villa María. http://hdl.handle.net/20.500.12272/2346

Bossolasco, M. L., Chiecher, A. C., & Dos Santos, D. A. (2019). *Diseño y validación de un instrumento para el análisis de trayectorias académicas en el primer año universitario* [Design and validation of an instrument for the analysis of academic trajectory in the first year of the university]. *Educación Superior*, (27), 11–38. https://doi.org/10.56918/es.2019.i27.pp11-38

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.

Osterwalder, A., Pigneur, Y., Bernarda, G., Smith, A., & Papadakos, T. (2014). *Value Proposition Design: How to Create Products and Services Customers Want*. Wiley.

# APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE MINDFULNESS EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL- PRIMEROS ABORDAJES

Martínez-Sánchez, Paloma María Teresa; Pimentel Bernal, Paul Marcelo.

*Ingeniería Industrial, Universidad Militar Nueva Granada; Administración de Empresas, Universidad de Lima.*
*paloma.martinez@unimilitar.edu.co; Ppimente@ulima.edu.pe*

**RESUMEN**

Este artículo presenta un primer acercamiento enfocado en la aplicación de un piloto de técnicas de mindfulness en estudiantes de sexto y octavo semestre en una Universidad en Colombia. En primer lugar, se realizó fue una revisión bibliográfica sobre los beneficios reportados desde la literatura para identificar las ventajas que conllevaba dicha práctica. Posteriormente, al finalizar el ejercicio de mindfulness los alumnos brindaron su retroalimentación mediante una encuesta desarrollada para tal fin. Los resultados evidencian que los estudiantes observan un impacto positivo dado que les permitió estar más conscientes del momento presente y algunos de éstos comentan que desearían seguir aplicando a futuro estas técnicas.

**Palabras Claves:** Mindfulness, Universidad, beneficios, bienestar, estrés.

**ABSTRACT**

This article presents an initial approach focused on the application of a pilot program using mindfulness techniques among sixth- and eighth-semester students at a university in Colombia. First, a literature review was conducted to identify the reported benefits of mindfulness practices and their potential advantages. Subsequently, at the end of the mindfulness exercise, students provided feedback through a specifically designed survey. The results show that students perceived a positive impact, as the activity allowed them to become more aware of the present moment, and some expressed their interest in continuing to apply these techniques in the future.

**Keywords:** Mindfulness, University, Benefits, Well-being, Stress

## 1. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta una primera aproximación de revisión bibliográfica de mindfulness, así como un piloto de aplicación de técnicas relacionadas con esta práctica en estudiantes de sexto y octavo semestre en una universidad.

En diversos estudios a nivel mundial se observa un incremento en la demanda de estudiantes universitarios que han requerido apoyo psicológico (Dawson et al., 2019; Loucks et al., 2020), especialmente en periodos recientes como durante la pandemia (Gong et al., 2023). La prevalencia de problemas de salud mental como la ansiedad y el estrés es notablemente alta entre los estudiantes universitarios, lo que subraya la necesidad de intervenciones preventivas y de apoyo (González-Martín et al., 2023; Cicuto & Demarzo, 2022). La alta prevalencia de trastornos mentales entre los estudiantes universitarios refuerza la necesidad crítica de intervenciones efectivas, como los programas basados en mindfulness (Pan et al., 2024).

La literatura evidencia diversidad de enfoques en relación al midfulness, desde intervenciones de corta duración aplicadas a población universitaria (Dawson et al., 2019; González-Martín et al., 2023), así como programas que buscan mejorar el bienestar psicológico y el rendimiento académico (Arango-Zuluaga, 2023) hasta estudios que buscan evidenciar el cómo impactan en la regulación atencional y otras funciones cognitivas esenciales para el desempeño académico (Wimmer et al., 2020). Otros estudios evidencian que estas prácticas mejoran la calidad del sueño y la satisfacción en estudiantes universitarios (Alvarado-García et al., 2025). Estos hallazgos se refuerzan con estudios que muestran mejoras significativas en el bienestar psicológico y la capacidad de atención, incluso en intervenciones breves y en formatos en línea (Devillers-Réolon et al., 2022; Chung et al., 2021).

En las publicaciones desarrollas por Nolte et al., (2022) así como Smith et al., (2023), se evidencia que el mindfulness ha sido empleado como una estrategia que permite mitigar el estrés, la ansiedad y la depresión y obtener mejoras en la atención y el bienestar general de los estudiantes universitarios (Gallo et al., 2023; Pan et al., 2024).

En el ámbito universitario, la implementación de estas intervenciones ha cobrado relevancia por su eficacia en mitigar el estrés, la ansiedad y la depresión, afecciones comunes en este grupo etario (González-Martín et al., 2023; Pan et al., 2024). De hecho, una revisión de la literatura indica que las intervenciones basadas en mindfulness han mostrado efectos positivos en la reducción del estrés, la ansiedad y la depresión en estudiantes de profesiones de la salud (Parsons et al., 2021).

La literatura muestra una amplia diversidad de enfoques en torno al midfulness, desde intervenciones de corta duración dirigidas a población universitaria (Dawson et al., 2019; González-Martín et al., 2023) hasta programas orientados a mejorar el bienestar psicológico y el rendimiento académico (Arango-Zuluaga, 2023). Otros estudios se han centrado en analizar su impacto sobre la regulación atencional y distintas funciones cognitivas vinculadas al desempeño académico (Wimmer et al., 2020).

Un beneficio adicional de las prácticas de mindfulness es su potencial para fortalecer recursos psicológicos y actuar como amortiguador frente a problemas de salud mental, promoviendo el bienestar general del estudiante (Modrego-Alarcón et al., 2023). Esto incluye el desarrollo de autocompasión, regulación emocional y flexibilidad cognitiva, componentes clave para enfrentar las presiones académicas y sociales inherentes a la vida universitaria (González-Martín et al., 2023).

Los fundamentos teóricos del mindfulness, que enfatizan la conciencia no enjuiciadora del momento presente, contribuyen a su eficacia al mejorar la conciencia metacognitiva y reducir la reactividad cognitiva, regulando así las respuestas fisiológicas y psicológicas al estrés (Alvarado-García et al., 2025).

Además, el entrenamiento en mindfulness ha demostrado mejorar resultados relacionados con la atención y la regulación emocional, cruciales para el desempeño académico y la adaptación a la vida universitaria (Huerta et al., 2021; González-Martín et al., 2023).

## 2.ALGUNOS CASOS DE APLICACIÓN DE MINDFULNESS EN INGENIERÍA

La práctica del mindfulness ha ganado mayor relevancia, tal como lo evidencia Kabat-Zinn (2003), ya que se enfoca en mantener la atención plena en el momento presente de manera consciente y sin juicios. En estudios desarrollados en ingeniería, se ha observado que presenta disminución en el estrés y mejoras en el bienestar psicológico, la concentración, así como en el rendimiento académico de los estudiantes (Huerta et al., 2021; Nolte et al., 2022; Crone et al., 2023).

Se ha evidenciado que el estrés pueden afectar la atención y la capacidad de aprendizaje técnico (Nolte et al., 2024; Huerta et al., 2021), siendo así que algunas universidades a nivel mundial han reconocido el impacto del estrés académico en estudiantes de ingeniería (Smith et al., 2023). En estudios realizados por Smith et al. (2023) observaron que los estudiantes de ingeniería presentan mayores niveles de estrés que otras disciplinas.

Algunos artículos evidencian resultados en estudiantes de ingeniería, entre los cuales se encuentra el de Nolte et al. (2022), quienes desarrollaron sesiones breves de mindfulness evidenciando que, acorde con lo expresado por los estudiantes, dicha práctica ayudaba a reducir la tensión emocional y mejorar su disposición mental ante tareas complejas, por su parte Dalton y Estrada (2023) observaron una reducción significativa del estrés percibido y un aumento en los niveles de atención plena en un programa grupal de mindfulness que realizaron con estudiantes, de igual forma Crone et al., (2023), confirmaron en su estudio que la aplicación de dicha técnica mejoró la percepción de bienestar general en los participantes.

Wimmer et al., (2020) así como Zastavker y Venkatesh, (2020), observaron también la aplicación del mindfulness no solo contribuyó a la disminución del estrés, sino que permitió funciones cognitivas esenciales para la toma de decisiones, la optimización de procesos y la innovación. Por otra parte, Huerta et al., (2021) resaltan el desarrollo de competencias intrapersonales e interpersonales críticas, tales como la empatía, la escucha activa y la autorregulación emocional, que se fortalecen mediante la práctica de mindfulness.

En esta línea, Crone et al. (2023) y Wang, Qi y Cheng (2025) plantean que el liderazgo consciente —derivado de la práctica de mindfulness— mejora la dinámica organizacional, fortalece la moral del equipo y estimula la creatividad en la resolución de problemas. Dichos beneficios son especialmente relevantes en la formación de ingenieros industriales, donde la eficiencia humana y organizacional desempeña un papel central en la productividad y la sostenibilidad.

## 3. APLICACIÓN DE MINDFULNESS

Con el fin de realizar un primer abordaje para determinar el estado de atención plena (Mindfulness) en estudiantes de sexto y octavo semestre de una universidad, se aplicó el cuestionario FFMQ -Five Facet Mindfulness Questionnaire- creado por Baer et al (2006). Este cuestionario es un instrumento ampliamente reconocido y validado a nivel mundial, y mide cinco dimensiones- Observar, Describir, Actuar con conciencia, No juzgar las experiencias internas y no reaccionar ante las experiencias internas- mediante 39 preguntas. A continuación se presentan los principales resultados.

En promedio, los participantes mostraron puntuaciones moderadas en las cinco dimensiones evaluadas: *Observar* M=3.1), *Describir* (M = 3.0), *Actuar con conciencia* (M = 3.0), *No reaccionar* (M = 3.0) y *No juzgar* (M = 2.8), en una escala de 1 a 5. Dichos resultados evidencian un nivel intermedio de mindfulness, con fortalezas en la observación y descripción de la experiencia presente, así como áreas de mejora en la autocompasión y en la atención plena durante la acción.

*Tabla 1. Resultados promedio por dimensión del FFMQ*

| *Dimensión* | *Media (M)* | *Desviación estándar (DE)* | *Interpretación general* |
|---|---|---|---|
| *Observar* | *3.1* | *0.6* | *Atención perceptiva moderada-alta* |
| *Describir* | *3.0* | *0.5* | *Expresión emocional funcional* |
| *Actuar con conciencia* | *3.0* | *0.5* | *Atención sostenida moderada* |
| *No reaccionar* | *3.0* | *0.6* | *Regulación emocional moderada* |
| *No juzgar* | *2.8* | *0.7* | *Tendencia a la autocrítica* |

La dispersión de los datos, evidenciados en el estudio sugiere diferencias individuales en relación al mindfulness en los grupos analizados, posiblemente relacionadas con estilos de afrontamiento, hábitos de estudio o carga académica. Con el fin de evaluar la consistencia interna del instrumento, se aplicó coeficiente Alfa de Cronbach, obteniendo un valor de $\alpha = 0.8$, valor que acorde con los criterios de Nunnally (1978) es considerado como bueno, y respalda la fiabilidad del cuestionario para la medición de Mindfulness en los estudiantes. Dicho coeficiente sugiere que los ítems presentan homogenidad y correlación adecuada, permitiendo confiar en la consistencia del instrumento.

Los resultados obtenidos en este primer piloto coinciden con lo expuesto por Huerta et al. (2018), quienes evidenciaron que los estudiantes de ingeniería presentan mayores dificultades para mantener la atención consciente durante la ejecución de tareas complejas, especialmente en los primeros años de formación.

Al finalizar la encuesta y luego de realizar ejercicios de mindfulness, se les preguntó a los participantes si recomendarían participar en talleres asociados a dicha temática, y se observó que el 82,1% afirmaron que lo realizarían con calificaciones entre 4 a 5 puntos, lo cual es coherente con el observado por Nolte et al. (2022) y Smith et al. (2023), quienes evidenciaron que los estudiantes que participaron en intervenciones breves de mindfulness reportaron mejoras notables en concentración y reducción de ansiedad.

## 4. CONCLUSIONES

- Las puntuaciones promedio en las dimensiones del cuestionario FFMQ, fueron moderadas, mostrando un nivel intermedio de atención plena entre los estudiantes que desarrollaron el taller.
- Los resultados obtenidos en el estudio piloto evidencian que el mindfulness podría ser una herramienta eficaz y de apoyo académico, para el manejo del estrés en estudiantes universitarios.
- El 82.1% de los participantes recomendarían la realización de talleres de mindfulness, por lo cual sería interesante desarrollar investigaciones longitudinales que permitan evaluar el impacto en el bienestar y el desempeño académico, con la práctica de este tipo de herramientas.

## 5. REFERENCIAS.


Alvarado-García, P. A. A., Vásquez, M. R. S., Gomez, F. M. I., Rodríguez, N. M. G., & Castro-Paniagua, W. G. (2025). *Effect of a mindfulness program on stress, anxiety, depression, sleep quality, social support, and life satisfaction: A quasi-experimental study in college students. Frontiers in Psychology, 16,* Article 1508934. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1508934

Baer, R. A., Smith, G. T., Hopkins, J., Krietemeyer, J., & Toney, L. (2006). *Using self-report assessment methods to explore facets of mindfulness. Assessment, 13*(1), 27–45. https://doi.org/10.1177/1073191105283504

Chung, J., Mundy, M., Hunt, I., Coxon, A., Dyer, K. R., & McKenzie, S. (2021). *An evaluation of an online brief mindfulness-based intervention in higher education: A pilot conducted at an Australian university and a British university. Frontiers in Psychology, 12,* Article 752060. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.752060

Crone, W. S., Scott, S. K., & Li, M. (2023). *Cultivating well-being in engineering graduate students through mindfulness training. PLOS ONE, 18*(4), Article e0281994. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281994

Dawson, A. F., Brown, W. W., Anderson, J., Datta, B., Donald, J. N., Hong, K., Allan, S., Mole, T. B., Jones, P. B., & Galante, J. (2019). *Mindfulness-based interventions for university students: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. Applied Psychology: Health and Well-Being, 12*(2), 384–410. https://doi.org/10.1111/aphw.12188

Devillers-Réolon, L., Mascret, N., & Sleimen-Malkoun, R. (2022). *Online mindfulness intervention, mental health and attentional abilities: A randomized controlled trial in university students during COVID-19 lockdown. Frontiers in Psychology, 13,* Article 889807. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.889807

Gallo, G. G., Curado, D. F., Machado, M. P. A., Espíndola, M. I. de, Scattone, V. V., & Noto, A. R. (2023). *A randomized controlled trial of mindfulness: Effects on university students' mental health. International Journal of Mental Health Systems, 17*(1), Article 604. https://doi.org/10.1186/s13033-023-00604-8

González-Martín, A. M., Aibar-Almazán, A., Rivas-Campo, Y., Castellote-Caballero, Y., & Carcelén-Fraile, M. del C. (2023). *Mindfulness to improve the mental health of university students: A systematic review and meta-analysis. Frontiers in Public Health, 11,* Article 1284632. https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1284632

Huerta, M. V., McKenna, A. F., & Guerra, R. (2021). *Inner engineering: Evaluating the utility of mindfulness training to cultivate intrapersonal and interpersonal competencies among first-year engineering students. Journal of Engineering Education, 110*(3), 637–659. https://doi.org/10.1002/jee.20407

Kabat-Zinn, J. (2003). *Mindfulness-based interventions in context: Past, present, and future. Clinical Psychology: Science and Practice, 10*(2), 144–156. https://doi.org/10.1093/clipsy.bpg016

Modrego-Alarcón, M., Morillo, H., Campos, D., Navarro-Gil, M. T., Montero-Marín, J., Monreal-Bartolomé, A., García-Campayo, J., & del Hoyo, Y. L. (2023). *Effects and acceptability of virtual reality to facilitate mindfulness practice in university students. Journal of Computing in Higher Education, 37*(1), 273–296. https://doi.org/10.1007/s12528-023-09393-y

Nolte, H., Huff, J., & McComb, C. (2022). *No time for that? An investigation of mindfulness and stress in first-year engineering design. Design Science, 8,* Article e5. https://doi.org/10.1017/dsj.2022.5

Nunnally, J. C., & Bernstein, I. H. (1994). *Psychometric theory* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Pan, Y., Li, F., Liang, H., Shen, X., Bing, Z., Cheng, L., & Dong, Y. (2024). *Effectiveness of mindfulness-based stress reduction on mental health and psychological quality of life among university students: A GRADE-assessed systematic review. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2024,* Article 8872685. https://doi.org/10.1155/2024/8872685

Parsons, D., Gardner, P., Parry, S., & Smart, S. (2021). *Mindfulness-based approaches for managing stress, anxiety and depression for health students in tertiary education: A scoping review. Mindfulness, 13*(1), 1–15. https://doi.org/10.1007/s12671-021-01740-3

Smith, A. R., & Johnson, R. L. (2023). *Mindfulness may help engineering students' experiences with stress. Journal of Engineering Education Research, 32*(2), 112–124. https://doi.org/10.1080/03043797.2023.1113258

Wang, M., Qi, Y., & Cheng, J. (2025). *Motivating green knowledge behavior by mindfulness leadership in engineering design: The role of moral identity. Buildings, 15*(2), 495. https://doi.org/10.3390/buildings15020495

Wimmer, L., Bellingrath, S., & von Stockhausen, L. (2020). *Mindfulness training for improving attention regulation in university students: Is it effective? and do yoga and homework matter? Frontiers in Psychology, 11,* Article 719. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00719

Zastavker, Y. V., & Venkatesh, M. J. (2020). *Democratizing engineering education through contemplative and mindfulness practices. Frontiers in Education, 5,* Article 77. https://doi.org/10.3389/feduc.2020.00077

Zhang, D., Shen, J., & Ma, H. (2024). *Exploring the applicability of a multifactor mindfulness scale in the Chinese college context. Frontiers in Psychology, 15,* Article 1415692. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1415692

# DESARROLLO DE COMPETENCIAS EN CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA: UN ENFOQUE DIDÁCTICO Y EXPERIMENTAL

Minnaard Claudia, Torres Zulma, Ciuro Alejandro, Ramos Florencia, Díaz Juan
*Instituto de Investigaciones de Tecnología y Educación, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora*
minnaardclaudia@gmail.com, iite@ingenieria.unlz.edu.ar, alejandroiciuro@gmail.com, s.florencia.ramos@gmail.com, juanediaz27@gmail.com

**RESUMEN**

El Control Estadístico de Procesos (CEP) es una disciplina fundamental para la optimización de la calidad y la eficiencia en cualquier sector industrial, siendo una herramienta esencial en la formación de ingenieros modernos. Se presentan los resultados de una investigación enfocada en el desarrollo de competencias en CEP entre estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (FIUNLZ). Se analizó la efectividad de un enfoque didáctico y experimental que combina la teoría con la aplicación práctica en entornos simulados y reales. Cabe destacar que, si bien el diseño focaliza en los estudiantes de grado de la FIUNLZ, se ha adaptado la propuesta a la Educación Técnico Profesional y al posgrado con distinto grado de complejidad.
La metodología implementada incluyó el uso de software especializado para el análisis de datos y la resolución de casos de estudio basados en escenarios industriales complejos. Un componente crucial fue la realización de prácticas de laboratorio donde los estudiantes pudieron diseñar y monitorear procesos, identificar fuentes de variación y proponer soluciones basadas en el CEP.
Los hallazgos revelan una mejora significativa en la comprensión teórica y la habilidad práctica de los estudiantes para aplicar las herramientas del CEP, como los gráficos de control, el análisis de capacidad de proceso y la implementación de planes de muestreo. Se observó un incremento en la capacidad analítica y de toma de decisiones ante situaciones problemáticas reales, lo que sugiere que la exposición a un entorno experimental potencia el aprendizaje y la retención del conocimiento.
El estudio subraya la importancia de integrar estrategias didácticas innovadoras y experiencias prácticas en la enseñanza del CEP. Al fomentar un aprendizaje activo y basado en la experimentación, se fortalece la formación de ingenieros competentes y preparados para enfrentar los desafíos de calidad y productividad en la industria.

**Palabras Claves:**Control Estadístico de Procesos (CEP), Competencias, Gráficos de control.

**ABSTRACT**

Statistical Process Control (SPC) is a fundamental discipline for optimizing quality and efficiency across all industrial sectors, making it an essential tool in the education of modern engineers. This paper presents the results of a research study focused on the development of SPC competencies among engineering students at the Faculty of Engineering, National University of Lomas de Zamora (FIUNLZ). We analyzed the effectiveness of a didactic and experimental approach that combines theory with practical application in simulated and real-world environments. Notably, while the design primarily targeted undergraduate students at FIUNLZ, the proposal was adapted with varying degrees of complexity for Professional Technical Education and postgraduate studies.
The implemented methodology included the use of specialized software for data analysis and the resolution of case studies based on complex industrial scenarios. A crucial component was laboratory practicals where students could design and monitor processes, identify sources of variation, and propose solutions based on SPC principles.
The findings reveal a significant improvement in students' theoretical understanding and practical ability to apply SPC tools, such as control charts, process capability analysis, and the implementation of sampling plans. An increase in analytical capacity and decision-making skills in real-world problem situations was observed, suggesting that exposure to an experimental environment enhances learning and knowledge retention. The study underscores the importance of integrating innovative didactic strategies and practical experiences into SPC education. By fostering active, experimentation-based learning, the training of competent engineers prepared to address industrial quality and productivity challenges is strengthened.

**Keywords:** Statistical Process Control (SPC), Competencies, Control charts

## 1. INTRODUCCIÓN

El Control Estadístico de Procesos CEP proporciona herramientas que permiten monitorear la variabilidad de los atributos o las especificaciones del producto o servicio (variables). Cada atributo o característica de calidad contribuye a la calidad general del producto o servicio. El objetivo del CEP es supervisar las etapas de producción, o de prestación del servicio, para identificar las causas de variación asignables (no aleatorias), responsables del aumento de unidades defectuosas.

Dado que la variación asignable por lo general es corregible, con los diagramas de control y demás técnicas, CEP proporciona una guía para la toma de decisiones: investigar el problema y encontrar la causa.

En este proyecto se plantea analizar distintos procesos que se utilizan en la industria. Los estudiantes reciben datos reales o simulados de este proceso y deben aplicar las herramientas de Calidad, como los gráficos de control y análisis de capacidad, para conocer el estado del proceso y evaluar la calidad del producto final.

El Control Estadístico del Proceso (CEP), también conocido por sus siglas en inglés SPC (Statistical Process Control), se define como un conjunto integral de metodologías, técnicas y acciones implementadas por una organización con el propósito fundamental de garantizar la manufactura de productos o la prestación de servicios que cumplan consistentemente con estándares de calidad predefinidos. (Lind, D. y otros (2012); Montgomery, D. y otro (2003); Triola, M. (2018)).

La aplicación del CEP se inicia en la fase de planificación del producto, específicamente durante la especificación de los atributos inherentes al producto o servicio. Esta práctica se extiende y mantiene activa a lo largo de toda la etapa de producción. Cada atributo, en cada fase del proceso productivo, contribuye de manera significativa a la calidad global del producto o servicio final. Para optimizar la efectividad del control de calidad, es imperativo identificar y detallar características críticas y especificaciones mensurables contra las cuales se cotejarán los atributos reales del producto o servicio.

Es importante reconocer que, en el contexto de un proceso industrial, la variabilidad es una condición inherente. Diversos factores de naturaleza aleatoria influyen en la producción, imposibilitando la creación de dos productos idénticos. En consecuencia, las características del producto manufacturado no son uniformes y exhiben un grado de variabilidad.

La definición moderna de calidad indica que "*La calidad es inversamente proporcional a la variabilidad*".

Esto implica que, si la variabilidad de las características importantes de un producto disminuye, la calidad del producto o servicio aumenta. (Montgomery, D. y otro (2003))

Esta variabilidad es claramente indeseable y el objetivo ha de ser reducirla lo más posible o al menos mantenerla dentro de unos límites.

El Control Estadístico de Procesos es una herramienta útil para alcanzar este segundo objetivo. Dado que su aplicación es en el momento de la fabricación, puede decirse que esta herramienta contribuye al mejoramiento de la calidad. Permite también aumentar el conocimiento del proceso, lo cual en algunos casos puede dar lugar a la mejora del mismo.

En un proceso hay dos fuentes generales de variación:

Las causas comunes de variación representan la variabilidad inherente que existe en un proceso. Estas fluctuaciones consisten en numerosas pequeñas causas de variabilidad que operan aleatoriamente o por casualidad. También se las designa como causas aleatorias de variación.

Las causas especiales de variación representan grandes fluctuaciones o patrones en los datos que no son inherentes al proceso. Estas fluctuaciones a menudo son causadas por cambios en el proceso que representan problemas para corregir u oportunidades para aprovechar. Y se las designa como causas asignables de variación. (Carro Paz, R. y otro (2014), Gutiérrez Pulido, H. y otro (2013). Lind, D. y otros (2012); Montgomery, D. y otro (2003); Triola, M. (2018)).

Los diagramas de control identifican el momento en que entran al proceso las causas asignables de variación o los cambios.

Hay dos tipos de diagramas de control:

Un diagrama de control de variables representa mediciones, como la cantidad de refresco de cola en una botella de dos litros o el diámetro exterior de una tubería. Este diagrama requiere un intervalo o escala de razón de medición.

Un diagrama de control de atributos clasifica un producto o servicio como aceptable o inaceptable. Se basa en la escala de medición nominal.

Se utilizan para variables categóricas o discretas: un electrodoméstico funciona o no funciona; el servicio de ventas online cumple con la entrega o no cumple.

De las 7 herramientas de la calidad dependiendo de los diferentes autores existen ligeras variaciones en la clasificación, e incluso se describen las mismas herramientas de distintas formas. De estas 7 hay 4 que responden a los contenidos estadísticos. (Figura 1)

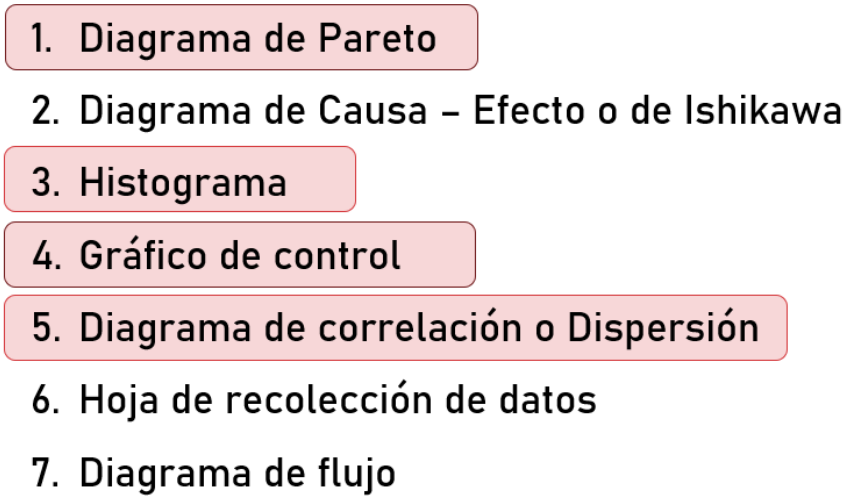



*Figura 1: Las 7 herramientas de la calidad*

**2. DESARROLLO**

La inclusión de los contenidos de CEP en la cátedra de Probabilidad y Estadística de la FIUNLZ surge a partir del plan de trabajo de un becario de las Becas a las Vocaciones Científicas (EVC – CIN) en el año 2020. Las herramientas adquiridas por el becario fueron posteriormente implementadas en su trabajo profesional.

En el presente trabajo se muestra el Laboratorio de CEP realizado en el primer cuatrimestre 2025.En línea con las aplicaciones del CEP en la ingeniería, la cátedra de Probabilidad y Estadísticapromueve el desarrollo del pensamiento estadístico entre sus estudiantes, aportando las nocionesy herramientas del CEP, con el fin de mejorar los sistemas productivos de una organización. Porotro lado, es frecuente que las prácticas de laboratorio estén limitadas al análisis de algunacaracterística de piezas manufacturadas: pero esta metodología didáctica no permite representarlas situaciones típicas que afrontaran los futuros ingenieros en los diferentes procesos demanufactura reales. De modo que la cátedra implementa una práctica de laboratorio donde aplicarmetodologías de construcción de gráficos de control, realizar el análisis de estabilidad y el análisisde capacidad de un proceso en un caso práctico: incorporando la asistencia de medios tecnológicoscon la capacidad de ejecutar análisis estadísticos útiles en la práctica profesional moderna.

El objetivo del Laboratorio es desarrollar las habilidades en el uso de software asistentes (Minitab y/o MegaStat) para resumir yobtener las métricas clave, con una matriz de datos recolectados, de las variables de interés ocaracterísticas de calidad, así como para la correcta interpretación de los resultados obtenidos alrepresentar gráficos de CEP u otro recurso estadístico entre las herramientas de la calidad.Pensar en forma estadística implica tomarinformación del proceso para conocerlo (análisisadecuado de los datos), y actuar de acuerdo conese aprendizaje para mejorar su calidad (acción,para reducir su variabilidad).

El Control Estadístico de Procesos (SPC) tiene como objetivo hacer predecible un proceso en eltiempo. Las herramientas usadas para este fin son las gráficas de control que permiten distinguirlas

causas especiales de las causas comunes de variación.(R. Carro Paz & D. González Gómez. (2014)). Una vez eliminadas las causas especiales, se logra un proceso estable o bajo control estadístico;es decir, un proceso predecible y afectado exclusivamente por causas aleatorias de variación.

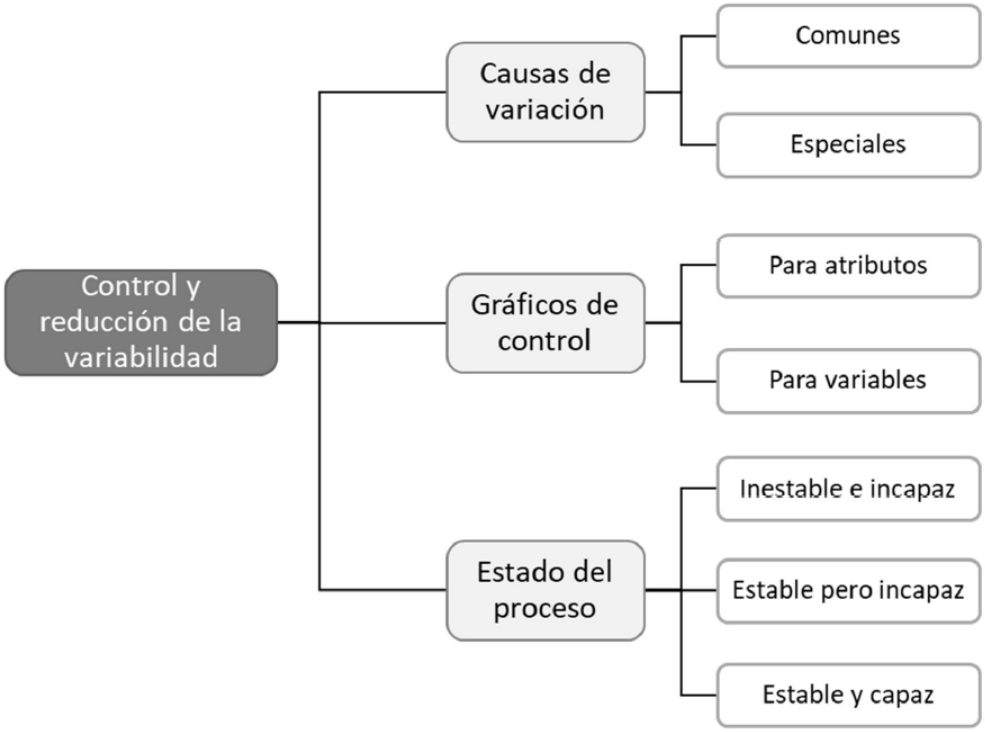



*Figura 2: Control y reducción de la variabilidad*

El Coeficiente Cp es un indicador de la capacidad potencial del proceso que resulta del cociente entre elancho de las especificaciones (variación tolerada: Ts – Ti) y la amplitud de la variación natural del proceso (6σ).
En tanto que el Coeficiente Cpk es un indicador de la capacidad real de un proceso que se puedever como un ajuste del índice Cp para tomar en cuenta el centrado del proceso.

$$C_{pk} = Mín\left\{\frac{\mu - Ti}{3\sigma}; \frac{Ts - \mu}{3\sigma}\right\}$$

Fórmula 1: Cálculo del Cpk

*Tabla 1: Valores de Cp y su interpretación*

- Valores de Cp y su interpretación

| Valor **Cp** | % Libre de defectos | PPM Defectuosos | Decisión, si el proceso está centrado |
|---|---|---|---|
| $C_p \geq 2$ | $99.\hat{9}$ | < 0.02 | Capaz: se tiene calidad Seis Sigma |
| $C_p \geq 1.33$ | $99.\hat{9} - 99.994$ | < 60 | Capaz: adecuado |
| $1 \leq C_p < 1.33$ | 99.73 - 99.994 | < 2699 | Parcialmente capaz: requiere un control estricto |
| $0.67 < C_p < 1$ | 99.73 - 95.45 | < 45500 | Incapaz: requiere análisis del proceso; y modificaciones serias. |
| $C_p \leq 0.67$ | < 95.45 | > 45500 | Incapaz: requiere acciones muy serias. |

Esta práctica de laboratorio propone trabajar con grupos de estudiantes de no más de 5 integrantes. Los estudiantes previamente, tienenrecorrido el material sobre Control Estadístico de Procesos, en el aula virtual de la cátedra. Y losgrupos deben contar con: la Guía de Trabajo, el archivo de la Base de datos compartida y al menosun computador portátil.
Los contenidos y tiempos del Laboratorio se describen a continuación:

- Introducción a la práctica de CEP
- Presentación del Caso 1
- Explicación de las funciones de estadística en el entorno de Minitab
- Análisis y solución del problema de acuerdo a las salidas de Minitab
- Presentación del Caso 2
- Explicación de las funciones de estadística en el entorno de Minitab
- Análisis y solución del problema de acuerdo a las salidas de Minitab
- Cierre: Elaboración del borrador del informe con resultados de cada grupo
- Duración de la práctica: 90 minutos.

Para la evaluación de este bloque temático, cada grupo de trabajo presenta en la siguiente clase el Informe de resultados con las conclusiones de los problemas propuestos de forma exhaustiva.
Los dos casos desarrollados en clase se presentan a continuación:

**CASO 1**

En un proceso de inyección de plástico una característica de calidad del producto (disco) es su grosor, que debe ser de 1.20 mm con una tolerancia de ± 0.10 mm. Así, para considerar que el proceso de inyección fue satisfactorio, el grosor del disco debe estar entre la especificación inferior, Ti = 1.10 y la superior, Ts = 1.30.
En un estudio de capacidad para este proceso es necesario contestar los siguientes interrogantes: ¿qué tipo de discos en cuanto a grosor se están produciendo? ¿El grosor medio es adecuado? ¿La variabilidad del grosor es estable o inestable? ¿El proceso es capaz o incapaz?
Para contestar estas preguntas, durante una semana se obtuvieron de una línea de producción los 125 datos de la planilla “Grosor Disco 100”. El muestreo fue sistemático: cada determinado tiempo se tomaban cinco productos y se medían, así al final de la semana se tuvieron los datos referidos. (Se les adjunta a los estudiantes una base de datos en Excel)

**CASO 2**

Se aplica un programa de control de calidad para un proceso, donde se fabrican grandes placas de acero, con un interés especial por los defectos superficiales. El objetivo es establecer una gráfica de control de calidad para el número de defectos por placa. Los datos se presentan a continuación, junto a la información sobre el tipo de defecto observado.(Se les adjunta a los estudiantes una base de datos en Excel)
a) Elabore las gráficas de control apropiadas utilizando esta información. Explique su elección.
b) Determinar el número medio de defectos superficiales, la dispersión y los límites de control.

c) En el proceso actual ¿Sobre qué problemas hay que diseñar acciones? Elaborar lasrecomendaciones del caso con base en la eficacia de su aplicación.

A partir del desarrollo exhaustivo de los dos casos presentados, se les propone a los estudiantes en el primer cuatrimestre 2025 el siguiente caso:

***CASO: Estudio de Control Estadístico de Procesos en línea de producción industrial.***

Una empresa dedicada a la fabricación de componentes metálicos desea llevar a cabo un estudio de Control Estadístico de Procesos (CEP) para analizar la variabilidad y estabilidad de su línea de producción. Se tomaron 200 muestras aleatorias de piezas fabricadas, registrando 10 variables físicas, térmicas y de proceso que podrían afectar la calidad del producto. Cada una de estas variables cuenta con una tolerancia preestablecida, definida en función de los requisitos técnicos y de calidad del producto.

El objetivo del estudio es responder interrogantes fundamentales como:

¿Las variables medidas se encuentran dentro de los límites de especificación?
¿El proceso presenta estabilidad a lo largo del tiempo?
¿Las condiciones actuales del proceso garantizan la calidad del producto?
¿El proceso es capaz de producir de manera consistente dentro de los rangos establecidos?

A través del análisis estadístico correspondiente, se buscará obtener un diagnóstico integral del proceso productiva, que permita identificar oportunidades de mejora y garantizar la eficiencia y calidad en la fabricación de componentes.

| Medida del espesor del producto final | Peso total de la pieza producida | Resistencia mecánica del material | Duración del proceso de fabricación de la pieza | Temperatura del entorno donde se produce | Humedad del aire en el entorno del proceso | Velocidad con la que se mueve la pieza en la línea | Presión aplicada durante el modelado o inyección | Volumen de líquido refrigerante utilizado | Tiempo necesario para enfriar la pieza antes del siguiente paso |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Espesor (mm)** | **Peso (g)** | **Resistencia (MPa)** | **Tiempo de Fabricacion (s)** | **Temperatura ambiente (°C)** | **Humedad relativa (%)** | **Velocidad de cinta transportadora (m/min)** | **Presión de Inyección (Bar)** | **Caudal de refrigeración (L/min)** | **Tiempo de enfriamiento (s)** |

Tabla 2: Variables estudiadas

**Tabla de tolerancias de las variables a analizar**

| Variable | Tolerancia | Unidad |
|---|---|---|
| **Espesor** | 5 ± 0,1 | mm |
| **Peso** | 200 ± 30 | g |
| **Resistencia** | 300 ± 60 | MPa |
| **Tiempo de Fabricación** | 120 ± 15 | seg |
| **Temperatura ambiente** | 23 ± 9 | °C |
| **Humedad relativa** | 50 ± 15 | % |
| **Velocidad de cinta transportadora** | 3 ± 4 | m/min |
| **Presión de Inyección** | 55 ± 10 | bar |
| **Caudal de refrigeración** | 17 ± 3 | L/min |
| **Tiempo de enfriamiento** | 10 ± 8 | seg |

*Tabla 3: Variables estudiadas - Tabla de tolerancias*

Algunas de las resoluciones de los estudiantes:
El ejemplo que se muestra corresponde a la variable temperatura ambiente, los estudiantes organizados en grupos de 5 debían analizar en forma exhaustiva la variable que les fue asignada.

**CASO ESTUDIADO POR UNO DE LOS GRUPOS DE TRABAJO**

Se considera que la temperatura de ambiente debe ser de 23 °C, con una tolerancia de ±9 °C. Por lo tanto, para que el proceso de producción sea considerado satisfactorio, la temperatura ambiente debe

encontrarse dentro del rango especificado, es decir, entre un límite inferior Ti = 14 °C y un límite superior Ts = 32 °C.

Condiciones de la temperatura ambiente:

- Variable X: Temperatura ambiente (°C)
- Especificación: 23 ± 9°C
- Datos muestrales:
    - Tamaño de muestra: N = 200
    - Media muestral: $\bar{x}$ = 22,8402°C
    - Desvío estándar muestral: S = 8,6956°C
    - Desvío estándar poblacional estimado: σ = 2,9488°C
    - Coeficiente de simetría: 0,0863
    - Máximo: 27,87°C
    - Mínimo: 18,06°C

Según los resultados obtenidos mediante el software estadístico, el coeficiente de simetría es menor que cero, por lo que la distribución de los datos es asimétrica positiva (sesgada a la derecha). También lo es el valor de curtosis, de -1,2894, lo que indica una distribución platicúrtica (más achatada que la normal).En cuanto a la variabilidad relativa, el coeficiente de variación (CV) es de 12,91 %, lo que sugiere que los datos son heterogéneos. Además, la media aritmética de 22,8402 °C no resulta representativa del conjunto de datos debido a la dispersión y a la presencia de valores atípicos.

**BoxPlot**

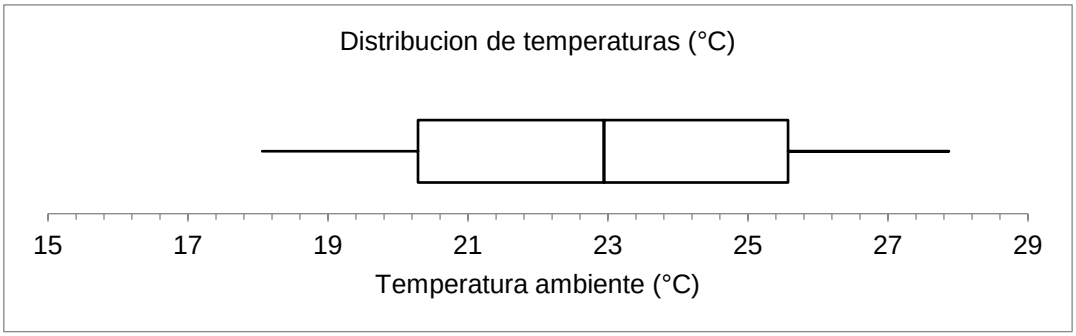



*Figura 3: Boxplot correspondiente a la variable Temperatura ambiente*

La media indicada por los softwares MegaStat y Minitab es de 22,8402 °C, valor que se encuentra dentro del rango de tolerancia establecido para la temperatura (23 ± 9 °C). Además, el diagrama de caja (boxplot) muestra que la totalidad de los datos de la muestra se ubican dentro de los límites especificados, es decir, no hay valores por debajo de 14 °C ni por encima de 32 °C.

**Estabilidad y control del entorno:**
El rango entre 21 °C y 24 °C podría considerarse el intervalo de mayor estabilidad y control del ambiente, dado que en él se agrupa la mayoría de los registros.

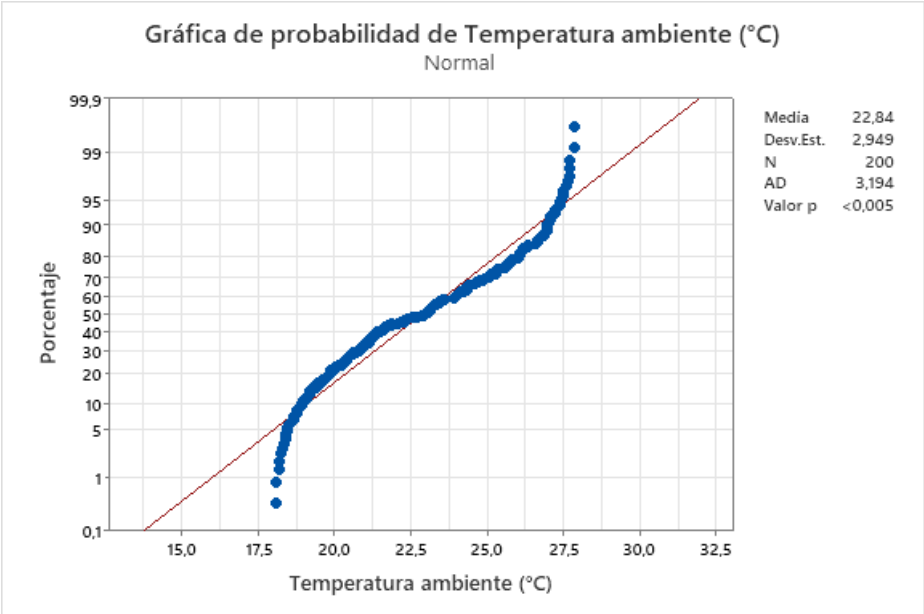



*Figura 4: Gráfica de probabilidad de la variable Temperatura ambiente*

Nivel de significación de la prueba: $\alpha$ = 0.05

Hipótesis nula y alternativa

$H_0$ : sigue distribucion normal

$H_1$ : no sigue distribucion normal

Regla de decisión:

Si el Valor p <$\alpha$ = 0.05 Rechazo $h_0$

Decisión estadística:

Como p-valor ≅ 0,0049 < 0.05 lo que significa que se rechaza $h_0$, por lo tanto, hay evidencia estadística que los datos no provienen de una población con distribución normal.

Se realizaron dos gráficos de probabilidad normal (un diagrama de media y un diagrama de rangos) para evaluar la distribución de un conjunto de 200 datos de temperatura ambiente.En ambos gráficos se observa que los puntos presentan una desviación sistemática respecto a la línea recta teórica, especialmente en los extremos. Esta desviación sistemática significa que los datos se alejan de manera consistente de la línea de referencia en el gráfico, lo cual sugiere que existe una estructura en los datos que no concuerda con la forma esperada de una distribución normal. Esta curvatura en forma de "S" es indicativa de que los datos no se ajustan a una distribución normal. Esta observación concuerda con lo evidenciado en el histograma, donde también se aprecia una distribución asimétrica.La segunda gráfica incluye los resultados de la prueba de Anderson-Darling, arrojando un estadístico AD=.194 y un valor p < 0.005. Este valor p proporciona evidencia estadísticamente significativa para rechazar la hipótesis nula de normalidad, confirmando que los datos no siguen una distribución normal.

En resumen, tanto la inspección visual de los gráficos como los resultados estadísticos indican que la distribución de temperatura ambiente no es normal. Este hallazgo es importante y debe ser considerado al seleccionar las técnicas estadísticas adecuadas para el análisis posterior, recomendándose el uso de métodos no paramétricos si se requiere asumir normalidad.

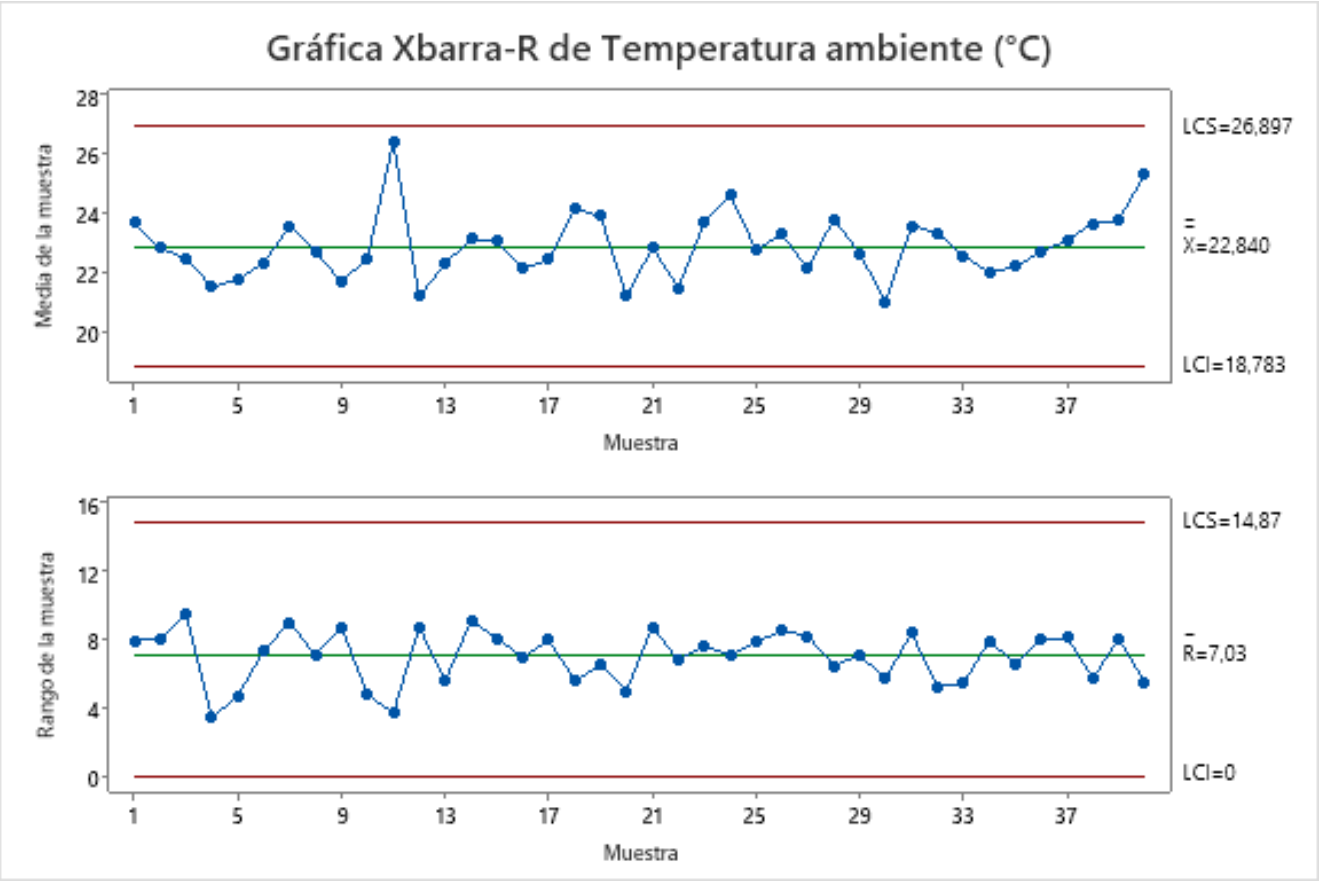



*Figura 5: Gráfica de medias y Gráfica de rangos*

Tanto la gráfica de la media como la de rangos indican que el proceso es estable desde el punto de vista estadístico, ya que no se observan puntos fuera de los límites de control. Esto sugiere que no hay presencia de cambios significativos o fuera de control en el proceso, indicando que se cumple con las condiciones requeridas para un entorno de producción adecuado. Se espera que los rangos de la temperatura ambiente del entorno donde se produce varíen de 0 a 14,47°C. Y se espera que las medias de la temperatura varíen de 18,783°C a 26,897°C.

Medidas de la capacidad del proceso:

Cuando se analiza la capacidad del proceso respecto a las especificaciones del cliente (temperatura objetivo de 23°C con tolerancia ±9°C, es decir, TI = 14°C y TS = 32°C), se obtienen los siguientes indicadores:

Coeficiente de capacidad de proceso (comparar la capacidad del proceso y la amplitud de las tolerancias a satisfacer):

$$Cp = \frac{TS - TI}{6\sigma} = \frac{32 - 14}{6\,.\,2{,}9488} = 1{,}01735102$$

$$1 \leq Cp \leq 1{,}33$$

$$1 \leq 1{,}01735102 \leq 1{,}33$$

Este valor indica que el proceso es parcialmente capaz. Esto significa que el proceso cumple con las especificaciones, pero con un margen justo, por lo que se recomienda aplicar un control estricto para mantener la conformidad a largo plazo.

Coeficiente de Capacidad Real (comparar la capacidad del proceso y la amplitud de las tolerancias a satisfacer considerando su centrado):

$$Cpks = \frac{TS - \mu}{3\sigma} = \frac{32 - 22{,}8402}{3\ .\ 2{,}9488} = 1{,}03541466$$

$$Cpki = \frac{\mu - TI}{3\sigma} = \frac{22{,}8402 - 14}{3\ .\ 2{,}9488} = 0{,}99928739$$

*Tabla 4: Valores de Cpk y su interpretación*

| $C_p$ | % libre de defectos | Defectos | | Tamaño de la muestra esperada para encontrar un defecto |
|---|---|---|---|---|
| | | Porcentaje | PPM | |
| 0,66 | 95,45 | 5 | 45.500 | 22 |
| 1 | 99,73 | 0,26 | 2.699 | 370 |
| 1,33 | 99,994 | 0,006 | 60 | 15.780 |
| 1,63 | 99,9999 | 0,0001 | 1 | 1.741.523 |
| 2,0 | 99,9999998 | 0,0000002 | 0,002 | 504.988.339 |

$$Cpk\ \min = 0{,}99928739 < 1$$

Este valor evidencia que el proceso está ligeramente descentrado hacia el límite inferior de especificación (TI = 14 °C), lo que puede representar riesgo de generar productos fuera de tolerancia.

Si se asumiera una distribución normal, la variabilidad natural de este proceso con Seis Sigma produciría el 99.73% de la temperatura ambiente entre 13,9937°C y 31,6867°C. Sin embargo, dado que los datos no siguen una distribución normal, este rango podría no contener realmente el 99.73% de las observaciones, lo que implicaría un mayor número de fallas que el estimado bajo supuestos normales.

Informe del Capability Sixpack del proceso para Temperatura ambiente (°C)

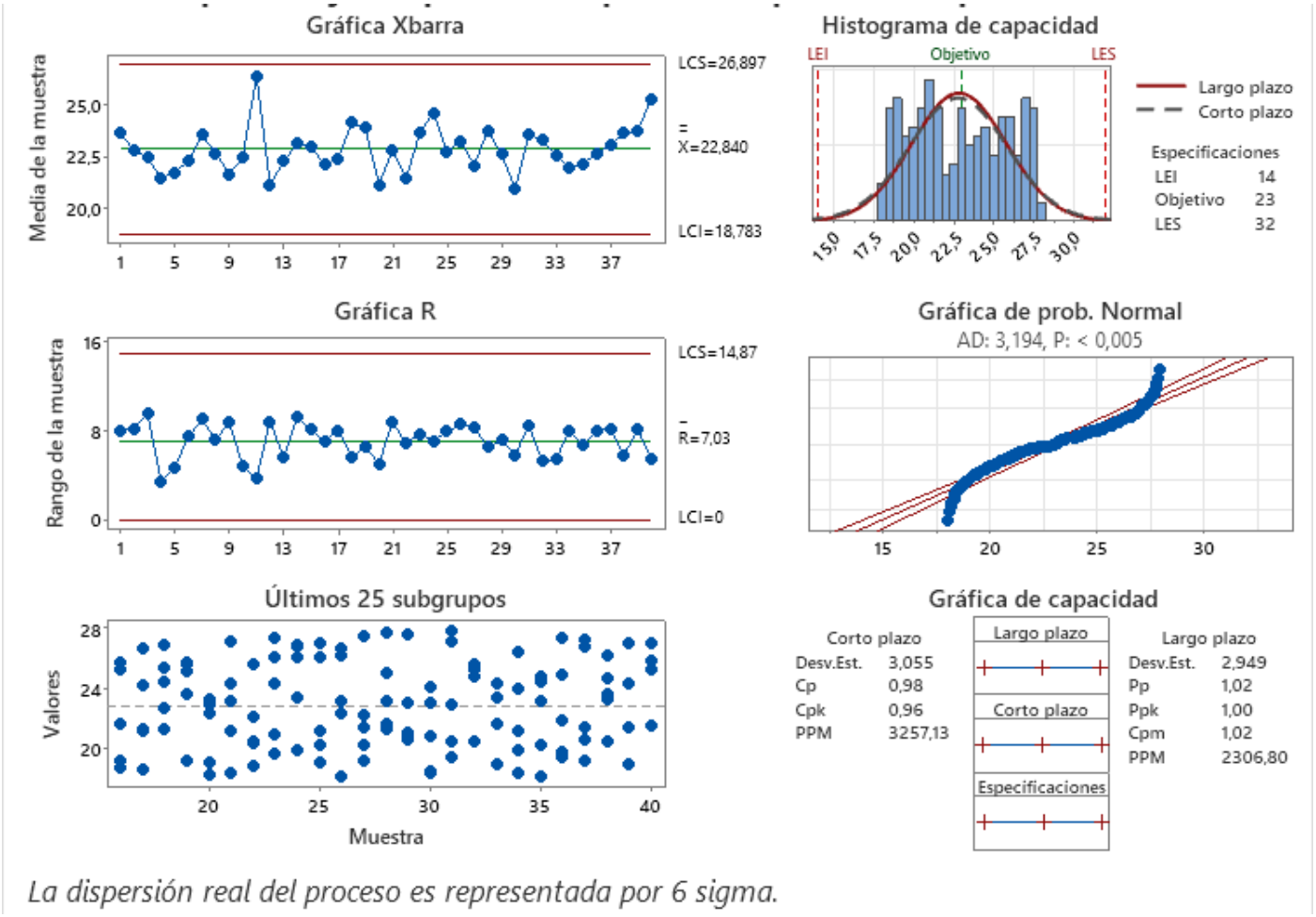



*Figura 6 : Informe del Capability Sixpack del proceso para Temperatura ambiente (°C)*

En síntesis: Actualmente, las variables medidas se encuentran dentro de las tolerancias establecidas, con un mínimo de 18.02 °C y un máximo de 27.87 °C.

Las gráficas de medias y rangos muestran que ningún valor excede los límites de control, por lo que el proceso se encuentra en control estadístico y es estable a lo largo del tiempo. Aunque el índice Cp es ligeramente superior a 1, el Cpk se encuentra por debajo del valor mínimo recomendado, lo que indica que el proceso es parcialmente capaz y está descentrado. Como consecuencia, el número estimado de piezas fuera de especificación (PPM) en el corto y largo plazo supera las 2,000 unidades por millón, lo que representa un riesgo significativo de producción fuera de la especificación de la temperatura ambiente. Además, dado que la distribución de los datos no es normal, estos cálculos podrían estar sujetos a errores que subestimen el riesgo real. En estas condiciones, no puede garantizarse la calidad del producto ni asegurarse que el proceso produzca de manera consistente dentro de los rangos establecidos. Se recomienda implementar acciones correctivas, incluyendo el monitoreo continuo del proceso, la identificación de fuentes de variación y ajustes que reduzcan la variabilidad térmica, buscando además una mayor alineación con el valor objetivo de 23 °C. Es necesario aplicar medidas de recentrado y control más estricto, ya que el proceso muestra un leve desvío hacia el límite inferior de especificación y apenas alcanza los niveles mínimos aceptables.Aunque no se observan señales claras de causas especiales (el proceso está en control), la alta dispersión, la asimetría positiva y la no normalidad de la distribución podrían deberse en parte a causas comunes, propias del diseño y condiciones actuales del proceso. Corregir esta variación requeriría mejoras estructurales en técnicas, métodos, materiales o equipos. Pero, a su

vez, estas mismas características podrían también estar indicando la existencia de causas especiales ocultas o intermitentes. Aunque la mayor parte de la variabilidad parece originarse en causas comunes, la presencia de asimetría, curtosis negativa y distribución no normal justifica profundizar el análisis. Para ello, debe reforzarse el monitoreo ambiental, la calibración de los equipos y la estandarización de los procedimientos de operación.

En resumen:

- El proceso está bajo control estadístico (estable).
- Es parcialmente capaz, con un Cp apenas superior a 1.
- Está levemente descentrado hacia valores más bajos.
- Aunque los valores actuales no indican un riesgo inmediato, se requiere un monitoreo continuo y posiblemente ajustes finos para mejorar el centrado y asegurar la conformidad del proceso frente a las especificaciones a largo plazo.

## 3. CONCLUSIONES.

Los resultados de la investigación demuestran una mejora sustancial en el dominio del control estadístico de procesos (CEP) por parte de los estudiantes. La evaluación en el dominio de la herramienta de CEP se realiza a través de una encuesta en la que se mide también, la adquisición de las competencias. Esto se manifiesta en una mayor habilidad para utilizar herramientas clave como los gráficos de control y para realizar análisis de capacidad. Además, se observó un desarrollo significativo en su capacidad de análisis y resolución de problemas, lo que indica que la metodología experimental empleada potencia el aprendizaje y la retención del conocimiento. Cabe destacar que, ya hace unos cuantos años, la FIUNLZ ha implementado un plan de estudios por competencias y que el desarrollo de herramientas como las que se muestran en el trabajo fomenta la adquisición de las mismas.Con respecto a las competencias se busca fortalecer las sociales y actitudinales detalladas en el Libro Rojo de CONFEDI(2018). En especial las relacionadas con la comunicación efectiva, el trabajo en equipo y el aprendizaje continuo.En conclusión, el estudio resalta la necesidad de incorporar estrategias didácticas innovadoras y experiencias prácticas en la formación de futuros ingenieros, preparándolos así para los desafíos del entorno industrial.

## 4. REFERENCIAS.

Carro Paz, R. y otro (2014). ADMINISTRACIÓN DE LAS OPERACIONES. Cap. 11 Control Estadístico de Procesos. Facultad de Ciencias Económicas y Sociales. Universidad Nacional de Mar del Plata.

Gutiérrez Pulido, H. y otro (2013). CONTROL ESTADÍSTICO DE LA CALIDAD Y SEIS SIGMA. 3ª ed. Cap. 10 Estado de un proceso: capacidad y estabilidad. McGraw Hill Education, México.

Lind, D. y otros (2012). ESTADÍSTICA APLICADA A LOS NEGOCIOS Y LA ECONOMÍA. 15ª ed. Cap. 19 Control estadístico del proceso y administración de la calidad. McGraw Hill Education, México.

Montgomery, D. y otro (2003). Probabilidad y Estadística Aplicada a la Ingeniería. 2ª ed. Cap. 15 Control estadístico de la calidad. Editorial LIMUSA, México.

Triola, M. (2018). ESTADÍSTICA (2018). 12ª ed. Cap. 14 Control estadístico del proceso. Pearson Education, México.

# MÁS ALLÁ DEL AULA: EVALUACIÓN DE LAS HORAS DE TRABAJO AUTÓNOMO POR ASIGNATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL (UNR)

Boudot, Diego; Rouillon, Esteban; Blotta, Valentin, Gómez, Daniela; Guzmán, Eliseo

*Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.*
diegoboudot@gmail.com
estebanjrouillon@gmail.com
valentinmarianoblotta@gmail.com
danielag@fceia.unr.edu.ar
eguzman@fceia.unr.edu.ar

**RESUMEN**

En 2023, el Consejo de Universidades impulsó una serie de reformas trascendentales para modernizar el sistema universitario argentino. Entre ellas, se destaca la creación del Sistema Argentino de Créditos Académicos Universitarios (SACAU), cuyo objetivo es aportar previsibilidad, flexibilidad e impulsar el reconocimiento internacional de las trayectorias académicas. En este marco, se resolvió que la Universidad Nacional de Rosario (UNR) adaptará todos sus planes de estudio al SACAU a partir del año 2027. Esta transformación busca favorecer la movilidad estudiantil, fomentar una mayor flexibilidad curricular y promover la internacionalización de la educación superior.
Uno de los principios clave del SACAU es contemplar el tiempo total de dedicación del estudiante, abarcando tanto las horas de clase como aquellas destinadas al trabajo autónomo (estudio, prácticas, elaboración de trabajos, entre otras). En este contexto, desde la Escuela de Ingeniería Industrial de la UNR (EII) se inició un proyecto para evaluar si las horas autónomas estimadas actualmente en los programas académicos reflejan la experiencia real de los estudiantes.
El presente trabajo forma parte de dicho proyecto, centrándose específicamente en la percepción de los alumnos sobre el tiempo de trabajo autónomo que requieren los distintos espacios curriculares. Para ello, se utilizará una metodología de investigación interdisciplinaria que combina encuestas, grupos de discusión y técnicas de triangulación de datos. Esta estrategia mixta permitirá integrar enfoques cuantitativos y cualitativos, generando evidencia relevante para validar o ajustar las estimaciones actuales. El objetivo final es aportar insumos que contribuyan a una implementación más precisa y representativa del SACAU, en línea con las necesidades reales del estudiantado.

**Palabras Claves:** SACAU; Créditos Académicos; Horas de Trabajo Autónomo; Investigación Participativa

**ABSTRACT**

In 2023, the Council of Universities promoted a series of far-reaching reforms to modernise the Argentinean university system. Among them, the creation of the Argentine System of University Academic Credits (SACAU), which aims to provide predictability, flexibility and promote the international recognition of academic careers, stands out. In this context, it was decided that the National University of Rosario (UNR) will adapt all its curricula to the SACAU from 2027. This transformation seeks to favour student mobility, foster greater curricular flexibility and promote the internationalisation of higher education.
One of the key principles of the SACAU is to contemplate the total time dedicated by the student, including both class hours and those destined to autonomous work (study, internships, work preparation, among others). In this context, the UNR School of Industrial Engineering (EII) has initiated a project to assess whether the autonomous hours currently estimated in the academic programmes reflect the real experience of students.
The present work is part of this project, focusing specifically on students' perceptions of the autonomous work time required by the different curricular areas. For this purpose, an interdisciplinary research methodology combining surveys, focus groups and data triangulation techniques will be used. This mixed strategy will allow the integration of quantitative and qualitative approaches, generating relevant evidence to validate or adjust current estimates. The ultimate goal is to provide inputs that contribute to a more accurate and representative implementation of the SACAU, in line with the real needs of the student body.

**Keywords:** SACAU; Academic Credits; Autonomous Work Hours; Participative Research

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el sistema universitario argentino ha comenzado un proceso de transformación con el objetivo de modernizar su estructura curricular, promover la movilidad estudiantil, mejorar la calidad educativa y facilitar el reconocimiento nacional e internacional de las trayectorias académicas, pero principalmente de acortar la brecha entre la duración real y teórica de las carreras de Educación Superior (Ministerio de Educación, 2023).

En este marco, la Resolución Ministerial 2598/23 del Ministerio de Educación de la Nación establece la puesta en marcha del Sistema Argentino de Créditos Académicos Universitarios (SACAU), que propone "implementar nuevas políticas académicas que garanticen reales oportunidades de egreso y que promuevan una reflexión sobre el currículum universitario, que tome en consideración las necesidades del contexto, de los/as estudiantes y del proceso de aprendizaje" (Ministerio de Educación, 2023).

En este se busca una nueva forma de contabilizar la carga horaria de las asignaturas migrando desde un sistema que se focaliza en la actividad docente (horas-reloj de "dictado" de clases) a centralizarse en la actividad del estudiante. Así, contemplando el tiempo total de trabajo del estudiante, incluyendo tanto las horas de clase como el trabajo autónomo o no presencial.

En consecuencia, para estimar la duración efectiva de una carrera universitaria se requiere calcular la carga horaria total que demanda cada actividad académica para el estudiantado. Para ello se debe considerar las exigencias y responsabilidades de cada unidad formativa. En este contexto, el trabajo autónomo del estudiante se convierte en un eje fundamental para estimar la carga horaria real de cada espacio curricular.

Inicialmente se considera que un crédito debería ser el equivalente a una dedicación de 25 a 30 horas de trabajo actuales del alumno, de las cuales una parte es presencial y otra corresponde al tiempo dedicado de forma independiente.

Esta reconceptualización obliga a las instituciones a revisar sus planes de estudio no sólo en términos de cantidad de horas presenciales, sino también en cuanto al diseño de actividades que promuevan y midan el trabajo autónomo de forma efectiva.

A partir de esta normativa, la Universidad Nacional de Rosario (UNR) ha establecido como meta la adaptación de todos sus planes de estudio al SACAU a partir del año 2027. Esta iniciativa implica múltiples desafíos, entre ellos la necesidad de contar con información empírica que permita evaluar si las estimaciones actuales de trabajo autónomo por asignatura en los programas de estudio se corresponden con la realidad vivida por los estudiantes.

Desde la Escuela de Ingeniería Industrial (EII) de la UNR, se ha iniciado un proyecto de investigación que tiene como finalidad analizar, desde la perspectiva estudiantil, la distribución real del tiempo dedicado fuera del aula a cada espacio curricular. En este estudio se busca identificar posibles desfases entre lo planificado y lo efectivamente realizado, con el fin de generar estimaciones que permitan ajustar la carga horaria en función de evidencias concretas y mejorar así la calidad del diseño curricular.

Para ello, se propone una metodología mixta de abordaje, con instancias cuantitativas y cualitativas, incluyendo encuestas y grupos focales, que permitan triangular datos y obtener una visión holística del trabajo autónomo en la carrera de Ingeniería Industrial. Este enfoque interdisciplinario busca también aportar al debate más amplio sobre la transformación pedagógica que implica el paso hacia un sistema universitario más flexible, transparente y centrado en el estudiante.

Estando en las etapas iniciales del proyecto, en este artículo se desarrollará el planteo del mismo y el diseño de la encuesta que será enviada al estudiantado para relevar las horas de trabajo autónomo.

## 2. PROPUESTA DEL PROYECTO

### 2.1. Planteo del Problema

Se considera que la sistematización de estas percepciones constituye un insumo fundamental para la toma de decisiones curriculares en el marco del SACAU. En este contexto, se vuelve necesario relevar y analizar datos en relación al tiempo de trabajo autónomo, es decir, el tiempo efectivo que demandan las asignaturas fuera de clase, con el fin de contrastarlos con las estimaciones teóricas actuales.

### 2.2. Objetivos

El objetivo principal del proyecto yace en evaluar la representatividad y precisión de las horas de trabajo autónomo estimadas en los programas académicos de la carrera Ingeniería Industrial de la UNR, con el fin de generar información que contribuya a la adecuada implementación del Sistema Argentino de Créditos Académicos Universitarios (SACAU).

Subobjetivos:

- Relevar, desde la perspectiva de los estudiantes, la cantidad real de horas de trabajo autónomo que dedican a cada espacio curricular.
- Analizar las diferencias entre las horas de trabajo autónomo estipuladas en los programas y las efectivamente invertidas por los alumnos.
- Diseñar y aplicar encuestas y grupos de discusión para obtener datos cualitativos y cuantitativos que permitan una visión integral.
- Proponer ajustes y recomendaciones para actualizar el plan de estudios de modo que las estimaciones de carga horaria autónoma sean más realistas.

### 2.3. Metodología

Como metodología se propone un enfoque metodológico mixto, donde en primer lugar se relevarán datos cuantitativos mediante una encuesta online anónima, y luego se profundizarán los hallazgos en esta etapa mediante instancias cualitativas, como grupos focales. Finalmente, se integrarán los resultados mediante técnicas de triangulación de datos para construir una interpretación robusta y representativa de los mismos.

En la primer etapa del estudio, se realizará una investigación cuantitativa descriptiva, mediante una encuesta orientada a estudiantes de todos los años y cohortes, que permitirá relevar datos por espacio curricular. Cada estudiante podrá completar múltiples registros correspondientes a las materias cursadas, indicando por cada una: Tiempo semanal de clases (en horas), proporción estimada de asistencia a clase (0% a 100%), tiempo total de trabajo autónomo realizado durante el cuatrimestre (en horas), condición obtenida al finalizar el cuatrimestre (promoción, examen CI, examen libre), si fue la primera vez que la cursó, y situación laboral durante la cursada (sin trabajo, trabajo part-time, full-time).

La población objetivo del estudio está compuesta por estudiantes regulares de la carrera de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, que hayan cursado al menos una asignatura durante el primer cuatrimestre del año 2025, lo que permitirá captar datos en base a la experiencia reciente, evitando estimaciones o subjetividades.

La muestra a utilizar serán todos aquellos estudiantes que completen dicha encuesta, dado que la encuesta se distribuirá de manera presencial y mediante canales institucionales y se mantendrá abierta a la participación voluntaria de todo el estudiantado que cumpla con el criterio de inclusión y por un periodo prolongado del segundo semestre.

Los datos serán recolectados en forma automática a través de Google Forms, generando una hoja de cálculo estructurada que contendrá los registros por estudiante y por materia, esto se demuestra en las figuras 1 a 3. Se realizarán controles de calidad de datos para detectar valores atípicos, omisiones o inconsistencias. El procesamiento se realizará en planillas de cálculo (Google Sheets o Excel), complementado con herramientas estadísticas básicas (análisis descriptivo, frecuencias, promedios, distribución, cruces bivariados). En etapas posteriores, se prevé el uso de software específico (R y Python) para el desarrollo de visualizaciones y análisis más profundos.

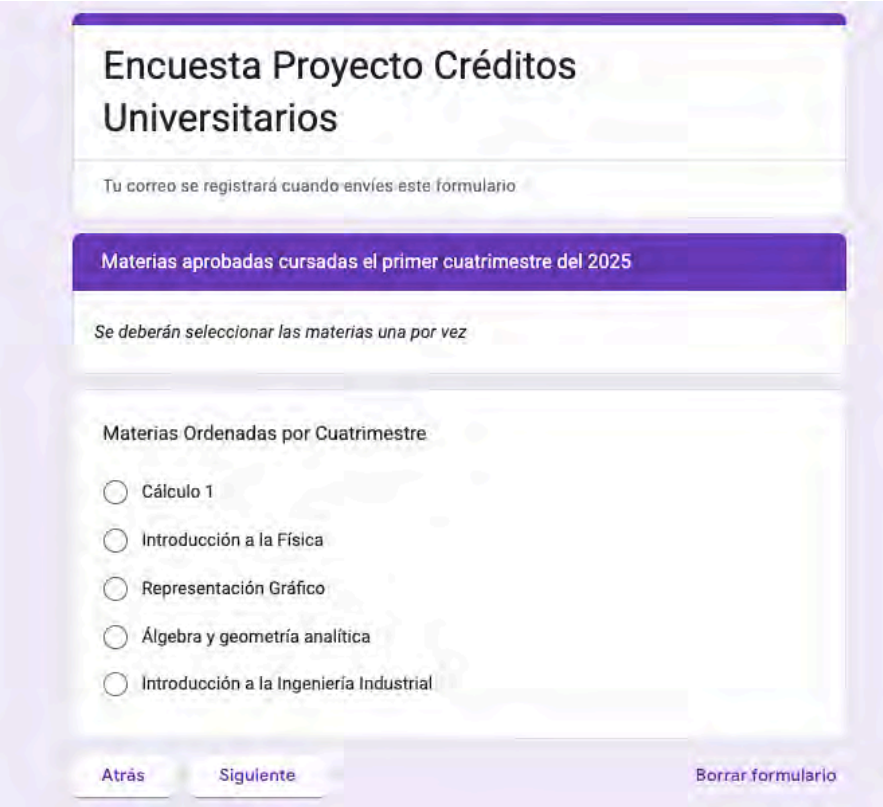



*Fig 1. Encuesta – Selección de espacio curricular*

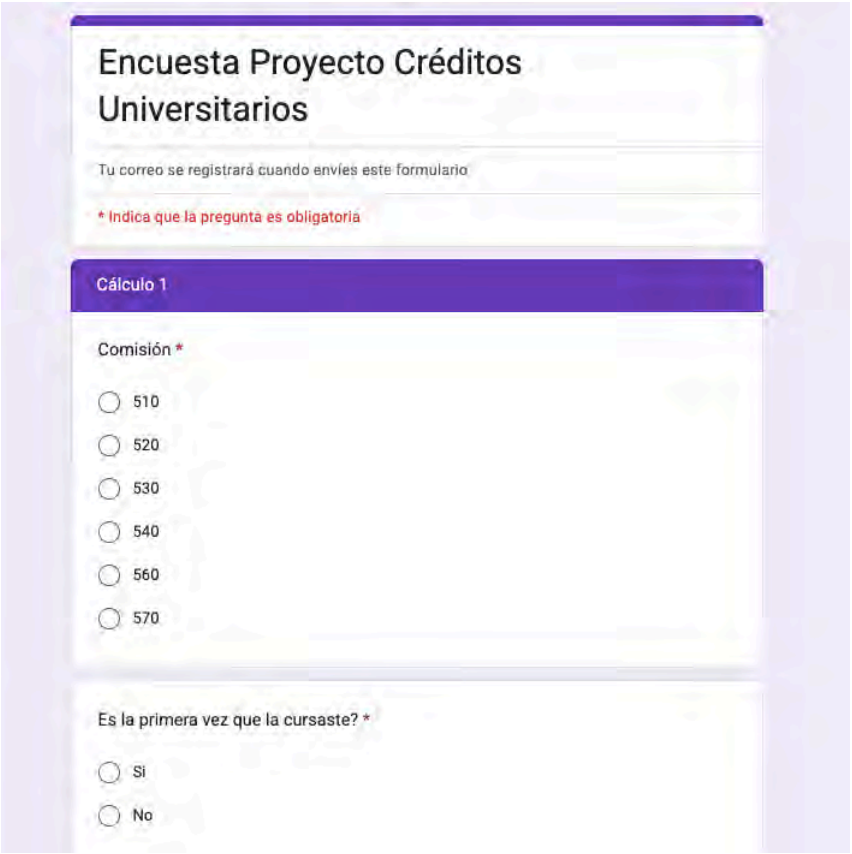



*Fig 2. Encuesta – Selección de Comisión.*




*Fig 3. Encuesta – Tiempo de trabajo autónomo total*

En una segunda fase, se prevé la implementación de grupos focales con estudiantes de distintos niveles y en diferentes situaciones con respecto a un espacio curricular específico, mezclando estudiantes que estén cursando el espacio curricular y que ya la hayan cursado y aprobado. Estos se realizarán con el fin de contextualizar los resultados cuantitativos y explorar dimensiones no captadas por la encuesta, como la percepción de exigencia, claridad en la organización del cursado y vínculo entre esfuerzo invertido y aprendizaje percibido. Esto permitirá construir una interpretación holística sobre la carga real de la carrera combinando los datos cuantitativos obtenidos en la encuesta y los cualitativos obtenidos en los grupos focales.

## 3. RESULTADOS ESPERADOS

Se espera que este estudio, tanto numérico como interpretativo, trace una distribución que se aproxime a la distribución real de horas de trabajo autónomo por asignatura en la carrera de Ingeniería Industrial de la UNR. En particular, se prevé:

- Detección de brechas entre las horas estimadas en los programas académicos y las efectivamente dedicadas por el estudiantado.
- Descubrimiento de patrones y tendencias asociados a variables como año de cursado, tipo de asignatura (teórica, práctica, mixta), situación laboral del estudiante y condición final obtenida.
- Recopilación de percepciones cualitativas sobre la carga de trabajo, la claridad en la organización de las asignaturas y la relación entre esfuerzo y aprendizaje percibido.

Posteriormente, se buscará proponer propuestas de ajuste fundamentadas para alinear las estimaciones de carga horaria autónoma con la experiencia real de los estudiantes, fortaleciendo la implementación del SACAU.
Con estos resultados se podrán no solo evaluar la representatividad de las horas de trabajo autónomo estimadas, sino también aportar un diagnóstico preciso que favorezca la planificación de actividades y estrategias pedagógicas más acordes a las demandas reales del estudiantado.

## 4. CONCLUSIONES.

La transición hacia el SACAU plantea un reto importante para las instituciones de educación superior, ya que exige repensar la carga horaria en función de la dedicación total del estudiante y no únicamente de las horas presenciales. Este proyecto se suma a esta renovación, sugiriendo un estudio práctico que mezcla cifras y análisis para verificar si los cálculos oficiales coinciden con la experiencia de los alumnos.
Se concluye que la participación activa de los estudiantes en la generación de estos datos además de enriquecer la calidad de la información obtenida, favorece también la construcción de un plan de estudios más transparente y centrado en las necesidades reales de la comunidad académica.
Asimismo, los hallazgos esperados constituyen una oportunidad para revisar y ajustar los planes de estudio, mejorando la distribución de la carga de trabajo y promoviendo un aprendizaje más equilibrado. En este sentido, el proyecto no solo ayuda a implementar bien el SACAU en la UNR, sino que también da pie a futuras investigaciones y prácticas exitosas que se puedan usar en otras carreras y universidades del país.

## 4. REFERENCIAS.


Ministerio de Educación. (2023, 15 de noviembre). Resolución 2598/2023 (RESOL-2023-2598-APN-ME). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Consejo Interuniversitario Nacional (CIN). (2023, 20 de octubre). Creación del Sistema Argentino de Créditos Académicos Universitarios. Recuperado el 16 de julio de 2025, https://www.cin.edu.ar/creacion-del-sistema-argentino-de-creditos-academicos-universitarios/

Universidad Nacional de Rosario. (2025, 14 de marzo). Aplicación del Sistema de Créditos en la UNR. Recuperado el 16 de julio de 2025, https://unr.edu.ar/aplicacion-del-sistema-de-creditos-en-la-unr/

Consejo Interuniversitario Nacional (CIN). (2023, 20 de octubre). Creación del Sistema Argentino de Créditos Académicos Universitarios. Recuperado el 16 de julio de 2025, https://www.cin.edu.ar/creacion-del-sistema-argentino-de-creditos-academicos-universitarios/

Universidad Nacional de Rosario. Implementación del crédito universitario en los planes de estudio de la UNR. Recuperado el 16 de julio de 2025, https://unr.edu.ar/implementacion-del-credito-universitario-en-los-planes-de-estudio/



**Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Escuela de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario por el constante apoyo brindado durante el desarrollo del proyecto.

# EDUCACIÓN EN CIENCIA DE DATOS EN INGENIERÍA INDUSTRIAL. APORTE A LAS COMPETENCIAS

Palomo, Máximo F; Adagio, Matías; Sanjuan, Oriana D

*Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas*
*Universidad Nacional de La Matanza*
mpalomo@unlam.edu.ar
matadagio@unlam.edu.ar
osanjuan@unlam.edu.ar

**RESUMEN**

El uso de ciencia de datos en los últimos años ha adquirido una mayor notoriedad y transcendencia en el apoyo a las decisiones en los distintos niveles de una organización. Esta visible tendencia en las organizaciones, sumado al avance en campos tales como la inteligencia artificial, la potencia de cálculo y las grandes capacidades de almacenamiento de las infraestructuras informáticas, hacen que se consideren estratégicos y valiosos los datos e información que cuenta cada organización como el conocimiento que se pueda obtener de estos.

Por ello, este artículo describe, por un lado, el estado de arte en la enseñanza de ciencia de datos en la formación de profesionales de Ingeniería Industrial de Argentina y Latinoamérica. Como así también, el uso de estas en Ingeniería Industrial como herramienta de apoyo a las decisiones, en particular en el análisis y medición de las competencias propuestas en los estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en Argentina plasmadas en el libro rojo del CONFEDI.

Por último, se propone un instrumento para el relevamiento del nivel de adquisición de las competencias mencionadas por los estudiantes, como así también propuestas de trabajo a futuro.

**Palabras Claves:** Ciencias de Datos, Ingeniería Industrial, Educación, Competencias.

**ABSTRACT**

The use of data science in recent years has gained greater notoriety and significance in decision support at various levels of an organization. This visible trend in organizations, coupled with advances in fields such as artificial intelligence, computing power, and the large storage capacities of IT infrastructures, means that the data and information held by each organization, as well as the knowledge that can be obtained from them, are considered strategic and valuable.

Therefore, this article describes, on the one hand, the state of the art in data science teaching in the training of Industrial Engineering professionals in Argentina and Latin America. It also describes the use of data science in Industrial Engineering as a decision support tool, particularly in the analysis and measurement of the competencies proposed in the second-generation standards for the accreditation of engineering programs in Argentina, as reflected in the CONFEDI Red Book.

Finally, a tool is proposed to assess the level of acquisition of the competencies mentioned by students, as well as proposals for future work.

**Keywords:** Data Science, Industrial Engineering, Education, Skills.

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de ciencia de datos en los últimos años ha adquirido una mayor notoriedad y transcendencia en el apoyo a las decisiones en los distintos niveles de las organizaciones. Esta visible tendencia en las mismas, sumado al avance en campos tales como la inteligencia artificial, la potencia de cálculo, capacidad de almacenamiento, y sobre todo el creciente interés de la sociedad por más datos, información y conocimiento de calidad, hacen que estos sean considerados de carácter obligatorio y estratégico en las organizaciones (Laudon & Laudon, 2024) (Toffler, 1980).

En particular, la universidad considerada una organización del tipo compleja y pesada (García, 2006) no es ajena a estas demandas. Hecho que Argentina se ve materializado a partir de los años 90, marcando el comienzo en el proceso de indagación de datos e información estandarizados de calidad en la educación superior, a través de la sanción de la Ley de Educación Superior Nro. 24.521 (Argentina, 2019); como también al inicio de organismos abocados a los datos e información tales como los Sistemas de Información Universitarios (SIU) en pos de la calidad de los datos e información en apoyo a la toma decisiones (SIU, 2023).

Este artículo tiene por objetivo indagar en el estado de arte de la enseñanza y el uso de Ciencia de Datos en la formación de profesionales de Ingeniería Industrial de Latinoamérica como en Argentina. Además, como estas pueden brindan soporte a las decisiones tácticas y estratégicas a los distintos actores de Ingeniería Industrial, más aún en el análisis y medición de las competencias propuestas en los estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en Argentina plasmadas en el libro rojo del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI) (CONFEDI, 2018).

Por ello, en este artículo nos encontraremos con un marco teórico, un estado del arte como así también la experiencia de la materia opcional llamada “Inteligencia Industrial” de la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de La Matanza (UNLaM), la cual tiene por objetivo brindar a los estudiantes los conocimientos en ciencia de datos aplicados y enfocados a casos de estudios particulares de la Ingeniería Industrial. Por último, el artículo propone un marco de trabajo para el uso de instrumentos para relevar el nivel de adquisición de las competencias adquiridas por parte de los estudiantes cuatrimestre a cuatrimestre, finalizando con las conclusiones y propuestas de trabajo a futuro.

### 1.1. Marco Teórico

El uso de Ciencia de Datos en los últimos años ha adquirido mayor interés e impacto en distintas áreas organizacionales de la sociedad (Laudon & Laudon, 2024), incluida la educación superior tanto en su enseñanza como su uso para distintas áreas internas, esto posibilitado por el avance y acceso a las tecnologías de la información tanto por su gran capacidad de almacenamiento como de cómputo para adaptarse a las nuevas demandas a la educación superior (Barba Maggi et al, 2023) (Guisado López, 2019) (Porven Rubier & Méndez, 2018).

En cuanto al uso de la palabra Ciencia de Datos, la podemos trazar a los años 60, de la mano de John W. Tukey en una aproximación a su definición contemporánea al dar otra mirada sobre la relación de la estadística y los datos (Tukey, 1962), seguida por Naur Peter en el uso explícito de la palabra ciencia de datos (Naur, 1974). Si bien el término, ha pasado por varias definiciones de la mano de referentes en la materia hasta la actualidad, es bueno destacar que esto se debe al producto del avance de las tecnologías mencionado.

Por su parte, (Porven Rubier & Méndez, 2018) marca el inicio del término Ciencia de Datos atribuyéndolo a Cleveland, aludiendo que es la continuación del análisis de los datos a través de distintas ramas tales como la estadística (Cleveland, 2001). No obstante, (Porven Rubier & Méndez, 2018) hace un recorrido por diversos autores tales como (Breiman, 2001), (Fawcett & Provost, 2013), (Van der Aalst, 2016), entre otros, los cuales ponen en evidencia el cambio de la definición de Ciencia de Datos de acuerdo con el avance de la tecnología.

Es bueno dejar en claro que, con Ciencia de Datos o su término en inglés Data Science, nos referimos a las herramientas y técnicas interdisciplinarias que generan entendimiento sobre el comportamiento del objeto de estudio a través de datos e información para el apoyo a las decisiones sobre este. Sumando a lo mencionado, hoy en día se la considera la intersección de tres áreas disciplinares tales como las matemáticas y estadísticas, informáticas como computacionales y el entendimiento del negocio (Ayankoya et al, 2014).

Por último, refiriéndonos al concepto de competencia, debemos tener en cuenta que el concepto en sí tiene una considerable ambigüedad, no sólo en estos tiempos sino desde sus orígenes dado que posee

múltiples significados y aplicaciones, además de la clásica definición de saber hacer. Por otro lado, también el término “competencias” está incluido en diferentes ámbitos desde el laboral, áreas económicas, áreas de conocimiento, etc. (Le Boterf, 2001), (Perrenoud, 2004), (Conde et al, 2020).

Si nos centramos exclusivamente en el ámbito de las “competencias” en la enseñanza, se debe tener presente, que no se tiene en claro bien su origen, dado que su concepto se aferra al profesionalismo, de la mano de la psicología conductista y modelos económicos, en especial el del capital humano de las grandes potencias mundiales, que venían trabajando con competencias desde los años 50, con el eslogan “saber hacer” (Le Boterf, 2001), (Perrenoud, 2004).

Entonces, y ante la gran disponibilidad de información en lo que respecta a la definición de competencia, nos basamos en la definición del CONFEDI donde competencia es la capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas (estructuras mentales) y valores, permitiendo entonces movilizar y poner a disposición distintos saberes en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales (Le Boterf, 2001), (Perrenoud, 2004), (CONFEDI, 2014), (CONFEDI, 2018), (CONFEDI, 2006).

### 1.2. Estado del arte

El rol de la Ingeniería Industrial en la sociedad sufre transformaciones producto de las evoluciones de los distintos tipos de tecnologías provocando el progreso y surgimiento de nuevas industrias, tales como las industrias de servicios y experiencias (Lovelook et al, 2018), (Fitzsimmons & Fitzsimmons, 2011). Por ello, (Porven Rubier & Méndez, 2018) muestra el rol de la ciencia de datos en apoyo al área industrial, de la mano de nuevos roles del profesional industrial tales como, el científico de datos, basándose en (Dhar, 2013), (Giama & Papadopoulos, 2016) y (O'Neil & Schutt, 2013).

Por ello, en trabajos como los de (Porven Rubier & Méndez, 2018) (O'Neil & Schutt, 2013) (Vega Vargas, 2020) y (Fontalvo-Herrera et al, 2018) se observan la importancia de la ciencia de datos en ingeniería, con el aporte de materiales ricos en revisiones bibliográficas de diversas fuentes en pos de apoyar el uso de esta. También, podemos hallar trabajos de tesis de grado, apoyando el uso de la ciencia de datos en Ingeniería Industrial como la propuesta en (Guisado López, 2019), el cual muestra el uso de las técnicas propias de la ciencia de datos aplicados a diferentes tipos industrias de bienes y servicios.

Por su parte, en Latinoamérica también se encuentran trabajos que apoyan la educación en ciencia de datos y su importancia en la formación de profesionales de ingeniería, tanto del equipo docente como de estudiantes, como los (Acuña, 2023) quien toma como sostén a (Han et al, 2012). Por otra parte, en (Barba Maggi et al, 2023) encontramos propuestas más ambiciosas como la creación de la carrera de Ingeniería en Ciencia de Datos, en este caso en Ecuador, mostrando por ejemplo, la demanda de este perfil y la escasez de ingenieros de datos, responsables de la búsqueda de conocimiento para el soporte de la toma de decisiones, además de una mirada mundial de los centros que dictan carreras con focos en los datos.

En lo particular, referido a la carrera universitaria de Ingeniería Industrial, nos encontramos con referencias a la importancia en la formación en ciencias de datos de los futuros profesionales, por ello (Vega Vargas, 2020), focaliza en cómo las actuales empresas no aprovechan aún las tecnologías derivadas de las ciencias de datos, pronosticando lo importante de esta formación en el futuro. No obstante, en el artículo de (Berinato, 2019) reflexiona en que aún debemos trabajar en la formación de la última milla en la comunicación de la información y conocimiento.

A un nivel alto de decisiones encontramos trabajos como el de (Fontalvo-Herrera et al, 2018), quien utiliza análisis de componentes principales sumado a técnicas de análisis Clusterig con el objetivo de comparar las instituciones basadas en las competencias que enseñan Ingeniería Industrial en Colombia. Es aquí donde se evalúan distintas características de cada institución con el afán de construir conocimiento para los distintos actores tales como estudiantes, docentes, coordinadores y agencias evaluadoras de la calidad universitaria.

En particular en Argentina, encontramos dentro de los planes de estudio de Ingeniería Industrial, universidades que ya ofrecen a los futuros profesionales la formación en ciencia de datos. Tal es así que, la oferta de la Universidad de Buenos Aires (UBA) incluye como materia opcional Ciencia de Datos para la Toma de Decisiones (UBA, 2025) y Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) también lo hace, pero en dos materias opcionales llamadas Análisis de datos para la toma decisiones I y II (UNGS, 2025).

Por su parte la Universidad Austral (UA) para Ingeniería Industrial brinda la posibilidad que sus estudiantes opten por la orientación en Ciencia de datos (UA, 2025). En el caso del Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), este brinda además varias materias opcionales enfocadas en ciencias de datos tales como Machine Learning para Negocios (ITBA, 2025).

En cuanto al estado de arte en el modelo de competencias propuesto y desarrollado por el CONFEDI (CONFEDI, 2018), institución que inicia su vida en el año 1987, toma como base los aportes realizados por (Perrenoud, 2004) y (Le Boterf, 2001) para elaborar una serie de publicaciones las cuales serán tomadas como referencias tanto en Latinoamérica y España para el desarrollo de las competencias en Ingeniería, pasando por su primer libro Azul, luego su libro Verde y la última edición conocida como el libro Rojo con los estándares de segunda generación para la acreditación de las carreras de Ingeniería en la República Argentina, basado también en los estándares de competencias para la enseñanza de Ingeniería.

Entonces, con la definición en mente de que competencia es la capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas (estructuras mentales) y valores, permitiendo movilizarlos con el objetivo de poner a disposición distintos saberes, en un determinado contexto, para resolver situaciones profesionales. Por ello, el CONFEDI (CONFEDI, 2006) (CONFEDI, 2014), (CONFEDI, 2018) distingue las competencias genéricas ingenieriles en dos categorías, cada una con las subcategorías indicadas:

1. Competencias tecnológicas

    1.1. Competencia para identificar, formular y resolver problemas de ingeniería.

    1.2. Competencia para concebir, diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería (sistemas, componentes, productos o procesos).

    1.3. Competencia para gestionar, planificar, ejecutar y controlar proyectos de ingeniería (sistemas, componentes, productos o procesos).

    1.4. Competencia para utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de la ingeniería.

    1.5. Competencia para contribuir a la generación de desarrollos tecnológicos y/o innovaciones tecnológicas.

2. Competencias sociales, políticas y actitudinales

    2.1. Competencia para desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo.

    2.2. Competencia para comunicarse con efectividad.

    2.3. Competencia para actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global.

    2.4. Competencia para aprender en forma continua y autónoma.

    2.5. Competencia para actuar con espíritu emprendedor

Estas competencias serán comunes a todas las ingenierías, y cada terminal, entendiendo por terminal a las carreras de ingenierías (CONFEDI, 2018), será la encargada de ver cómo trabajaran cada una de ellas dentro de las distintas cátedras.

Además, se proponen las que son de incumbencia exclusiva de cada ingeniería, por ello Ingeniería Industrial cuenta con el anexo 14 del (CONFEDI, 2018), donde se especifican las mismas, las cuales son:

1. Diseñar, proyectar y planificar operaciones, procesos e instalaciones para la obtención de bienes industrializados

    1.1. Diseñar, proyectar, calcular, modelar y planificar las operaciones y procesos de producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios).

    1.2. Diseñar, proyectar, especificar, modelar y planificar las instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios).

2. Dirigir y/o controlar las operaciones y el mantenimiento de lo anteriormente mencionado.

    2.1. Dirigir, gestionar, optimizar, controlar y mantener las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios)

2.2. Evaluar la sustentabilidad técnico-económica y ambiental de las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios).

3. Certificar el funcionamiento y/o condición de uso o estado de lo mencionado anteriormente

3.1. Gestionar y certificar el funcionamiento, condiciones de uso, calidad y mejora continua de las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios).

4. Proyectar y dirigir lo referido a la higiene y seguridad y control del impacto ambiental en lo concerniente a su actividad profesional.

4.1. Proyectar, dirigir y gestionar las condiciones de higiene y seguridad en las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios).

4.2. Gestionar y controlar el impacto ambiental de las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios).

Con respecto a competencias encontramos trabajos en torno a su medición tales como los de (González & Andrada, 2024) y (Gon & Agosta, 2020). Cabe destacar que, además, se encuentran trabajos referidos a las competencias en el contexto de Aislamiento Social Preventivo y Obligatorio (ASPO) que atravesó Argentina, aplicados a las competencias especificas dentro de ingeniería como los de (Bravo et al, 2021) y (D´Onofrio & Morcela, 2022).

En lo que respecta a UNLaM, esta fue creada en el año 1989 por la Ley 23.748, la misma es una institución educativa pública ubicada en el partido de La Matanza, siendo este uno de los 135 partidos de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, y la misma al igual que cualquier universidad del territorio de la República Argentina se encuentra regida por la Ley de Educación Superior Nro. 24.521 (Argentina, 2019), siendo su marco de referencia hasta la actualidad para sus distintos órganos.

En ella, la carrera de Ingeniería Industrial nace en el año 2000 a pedido del DIIT, encargando dicha tarea al Ing. Mecánico Lerch, Carlos José (1941- 2021) (De Vedia, 2023) junto a otros colaboradores, siendo el primer coordinador de dicha carrera. Para sumar hitos, la misma participa en el primer Congreso Internacional de Ingeniería Industrial y Afines (COINI), el cual se llevó a cabo en su sede de San Justo provincia de Buenos Aires, asumiendo el trabajo de organización en conjunto con la UTN Regional Avellaneda en el año 2007. Por el lado de UNLaM, estas tareas fueron llevadas adelante por el segundo coordinador Ing. Lic. Sacerdoti, Aldo en conjunto con el Ing. De María, Eduardo Juan, quien a posteriori asumiría la Coordinación de la carrera Ingeniería Industrial siendo su tercer coordinador.

En cuanto a trabajos de investigación o artículos referidos al trabajo de las competencias en distintas unidades académicas en UNLaM nos encontramos con los aportes de (Brangold, 2022), (Ormart et al, 2013) y (Fulugonio, 2014). En particular, en Ingeniería por su parte nos encontramos con aportes de (Ryckeboer et al, 2014), (Juarez et al, 2017) (Igarza, 2018), (Conde et al, 2020) y (Jeandet, 2023). Y enfocados en materias particulares con los de (Conde et al, 2018), (Aubin et al, 2017), (Pérez et al, 2021), (Conde & Igarza, 2017), (Pérez S. N. et al, 2023).

## 2. DESARROLLO

La materia Inteligencia Industrial es planteada como opcional en el plan de estudios de Ingeniería Industrial de UNLaM y tiene por objetivo brindar a los estudiantes los conocimientos en ciencia de datos aplicados y enfocados a casos de estudios particulares de Ingeniería Industrial. En la misma, según su plan de estudio, se plantea el aporte al desarrollo de las siguientes competencias:

Genéricas:

Competencias tecnológicas: 1.1, 1.2, 1.4 y 1.5.

Competencias sociales, políticas y actitudinales: 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4.

Específicas:

1.1, 2.1, 2.2 y 3.1.

Por otra parte, en la actualidad, la carrera de Ingeniería Industrial en UNLaM se encuentra atravesando el proceso de acreditación, para ello, se han planteado varios objetivos entre ellos el cambio del plan de estudio basándose en las competencias propuestas en el libro rojo (CONFEDI, 2018) y sus

recomendaciones. Es aquí donde podemos encontrar el primer paso local en Ingeniería Industrial hacia la formación en competencias.

Ante tal escenario, surge la necesidad de construir instrumentos para su análisis y medición, situación que debería ser transversal al resto de las ingenierías a lo largo de la República Argentina. Por ende, desde la materia Inteligencia Industrial se proponen la construcción de instrumentos acordes desde el conocimiento de la materia.

## 2. METODOLOGIA

El presente artículo consta de propuestas para medir competencias, las mismas están basadas en encuestas para la recolección de datos e información para distintas instancias de la materia. Por un lado, la rúbrica de evaluación del trabajo practico integrador por parte del equipo docente, y por otro lado, una auto evaluación realizada por los estudiantes para conocer su percepción de competencias adquiridas. En ambas se plantean los conceptos de aplicar Ciencia de Datos para analizar las competencias propuestas por el CONFEDI.

En ambas propuestas se simularon las respuestas de 100 estudiantes, en el caso de la rúbrica de evaluación del trabajo práctico integrador este se encuentra disponible en el siguiente enlace URL, por otro lado, en el caso de autoevaluación por parte de los estudiantes este se encuentra en enlace URL. Esto obedece a que aún en la materia no se cuenta con tantos datos de estudiantes, sumado al hecho de preservar sus datos en las herramientas utilizadas para hacer ciencia de datos.

Dentro de las herramientas analizadas, las mismas se encuentran representadas por la Tabla 1, en donde se deja en evidencia de ciertas consideraciones en las herramientas a utilizar y el cuidado de los datos con que se van a trabajar. Se plantea la utilización de la herramienta Google Colab® con el fin de poder compartir el código fuente de cada análisis realizado, el cual puede ser copiado y utilizado en forma local. Por ello en la siguiente URL se encuentra el código correspondiente a la rúbrica de evaluación del trabajo práctico y en el siguiente URL se encuentra el código de la autoevaluación por parte de los estudiantes.

*Tabla 1 Ejemplo de Tabla insertada en el Texto.*

| Herramienta | Tipo | Precio | Almacenamiento de datos | Código |
|---|---|---|---|---|
| **Libre office®** | Planilla de Calculo | Gratis | Local | Abierto |
| **Microsoft Excel®** | Planilla de Calculo | Pago con licencia | Local/Cloud | Cerrado |
| **Google Colab®** | IDE para Python y otros | Gratis con limitaciones | Cloud | Cerrado |
| **R Studio®** | IDE para R | Gratis | Local | Abierto |
| **Knime®** | IDE low code con soporte para Python y R | Gratis | Local | Abierto |

Comenzando con el análisis de los resultados, la autoevaluación realizada se compone de una serie de preguntas de múltiples opciones de respuesta con un rango de valores definidos entre 1 y 4 relacionados directamente con las categorías de Nulo, Bajo, Medio y Alto desarrollo de la competencia especifica, la cual vislumbra el grado de percepción que presenta el estudiante con la categoría asociada a cada competencia específica.

Los datos obtenidos permiten analizar diferentes comportamientos de los estudiantes y evaluar el cumplimiento de los indicadores de desempeño asociados a la asignatura para definir accionables aplicables a futuros cursos como la actualización del contenido dictado, el reordenamiento de los módulos, fortalecimiento de las actividades prácticas o colaborativas. Por ello, dentro de los resultados en primer término se obtiene una visualización de la percepción de los estudiantes a las competencias evaluadas como muestra la Figura 1. Además, en la Figura 2 se muestra la visualización de la matriz de correlación entre las competencias.

Por otra parte, en la Figura 3 el gráfico de barras corresponde al porcentaje alcanzado por cada competencia sobre la máxima puntuación percibida en la autoevaluación y en la Figura 4 el gráfico de radar o gráfico de telaraña, el cual es ideal para comparar el rendimiento de múltiples sujetos en varias métricas a la vez, por ello se observa el desempeño de la muestra de 10 estudiantes.

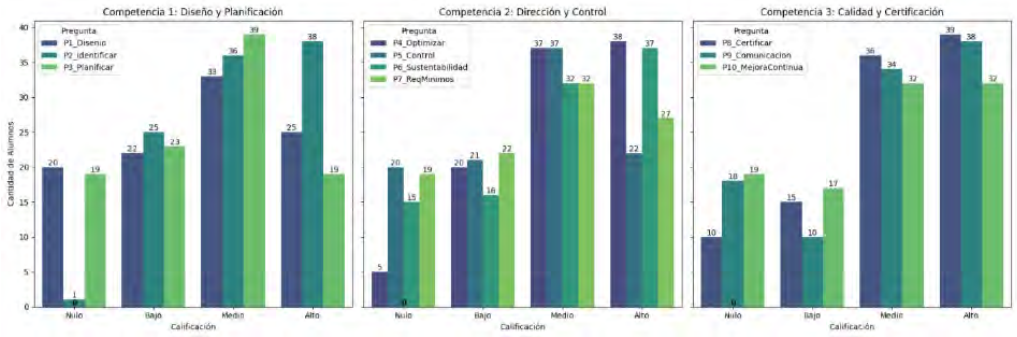



*Figura 1 Percepción de los estudiantes a las competencias adquiridas.*

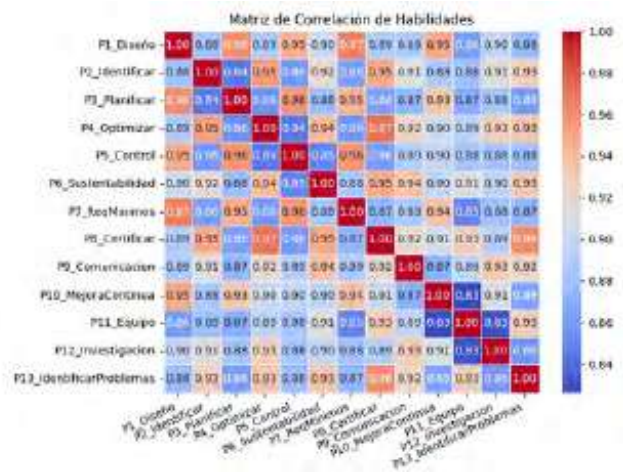



*Figura 2 Mapa de correlación entre competencias.*

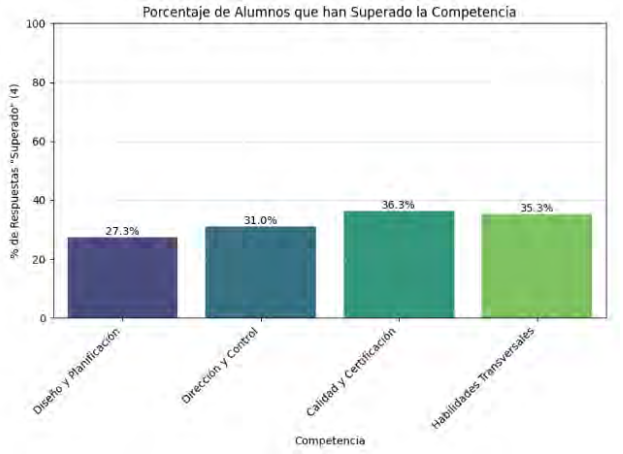



*Figura 3 Porcentaje de estudiantes que han superado las competencias.*

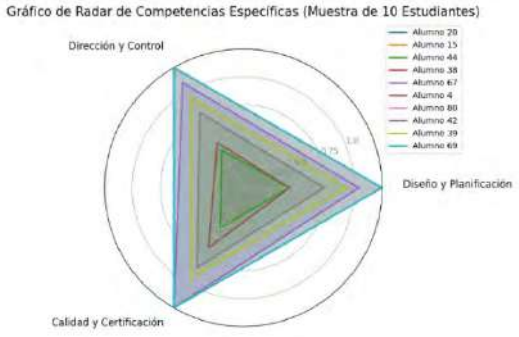



*Figura 4 Gráfico de Radar con correlación de las competencias específicas.*

En el caso del análisis del dataset generado de la evaluación de la rúbrica por parte de los docentes para cada estudiante, en primer término, nos encontramos con la Figura 5 que representa el gráfico de las competencias evaluadas y un puntaje final. Asimismo, en la Figura 6 se representa el grafico de dispersión del puntaje final con respecto a las mediciones de las distintas competencias en forma individual.

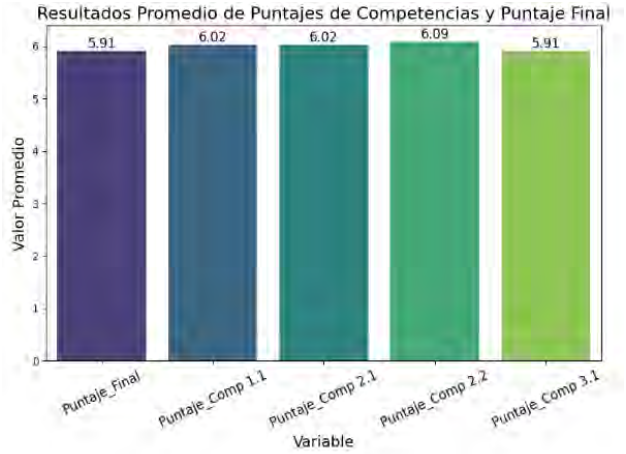



*Figura 5 Resultado promedio de las competencias y puntaje final*

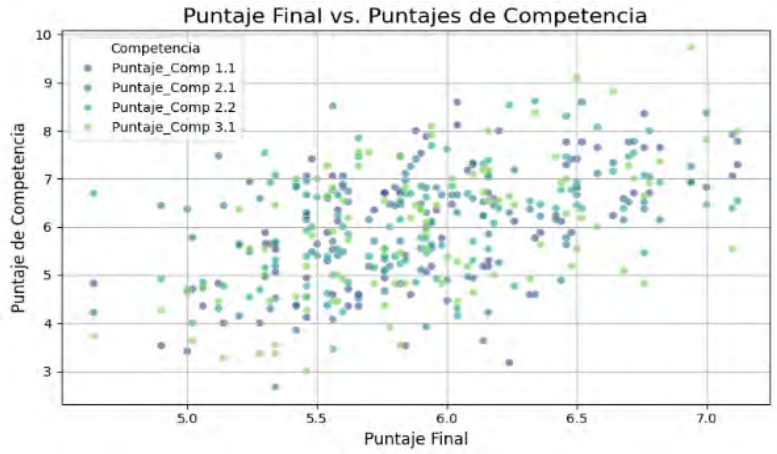



*Figura 5 Resultado promedio de las competencias y puntaje final*

Además, sumamos la Figura 6 que representa el grafico radar de 10 estudiantes al azar en cuanto al desarrollo de las competencias comparado con el promedio de los 100 estudiantes.

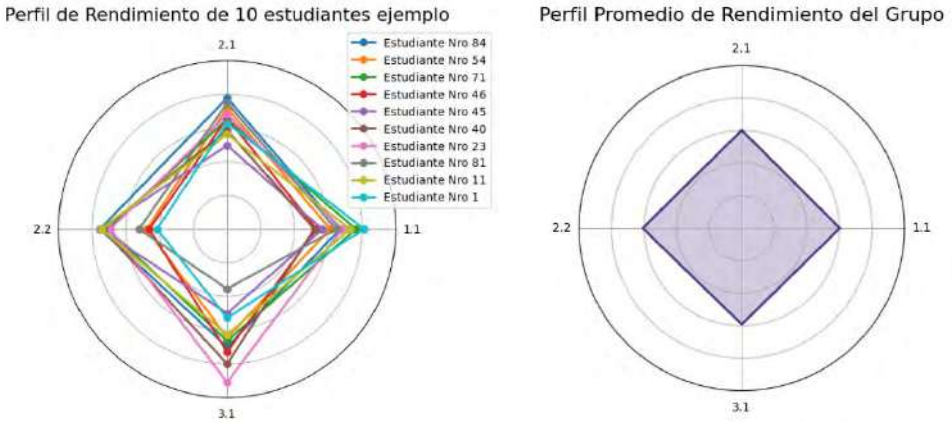



*Figura 6 Grafico de Radar de visualización de competencias en 10 estudiantes y el promedio general*

Por último en la figura 7, se presentan gráficas de histogramas para poder observar cómo es la distribución del desempeño de los distintos puntajes promedio de las competencias y el puntaje general.

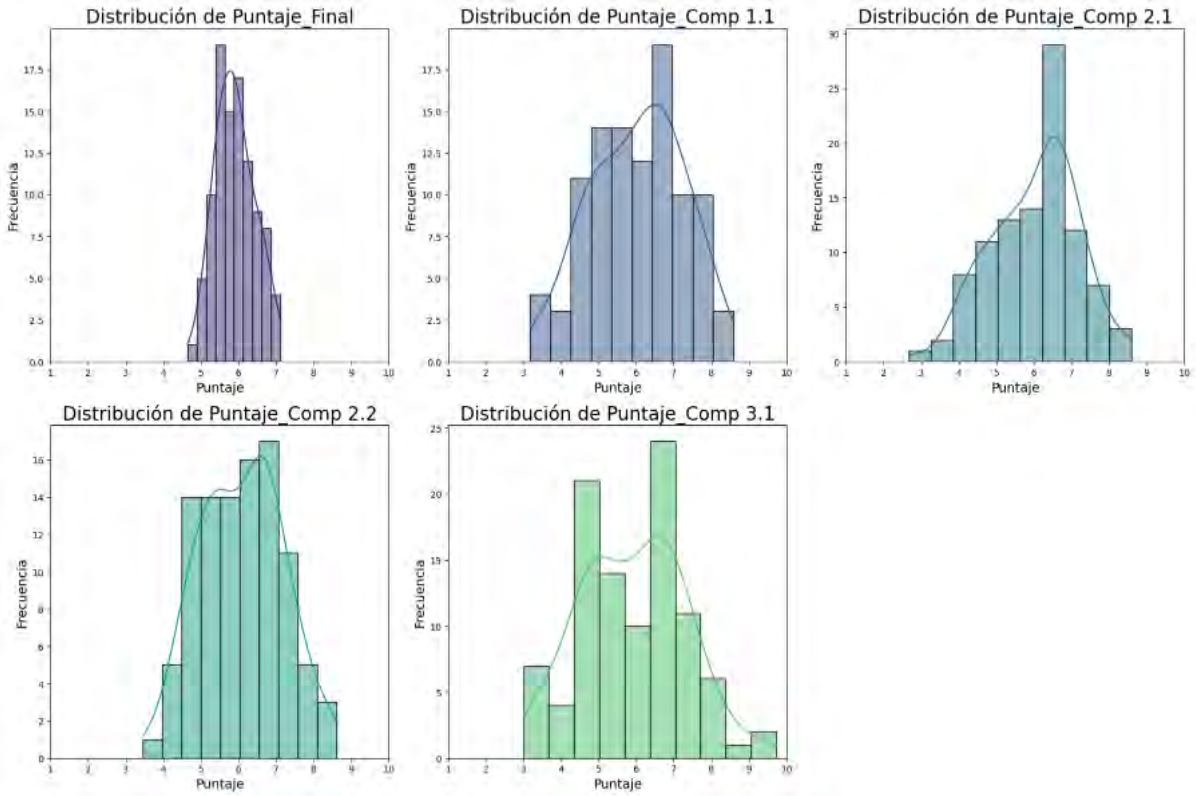



*Figura 6 Grafico con histogramas con distribución de los puntajes de competencias*

## 3. CONCLUSIONES.

A lo largo del artículo, luego de recorrer un marco teórico y un estado del arte, hemos analizado la importancia de la enseñanza de ciencia de datos en Ingeniería Industrial para los futuros profesionales, y como esta sirve de apoyo al análisis como a las decisiones a través de sus distintas herramientas. Además, hemos mostrado su uso en la materia Inteligencia Industrial con el objetivo de poder analizar y medir las competencias propuestas en el libro rojo del CONFEDI, compartiendo todos los códigos fuentes y datasets para los diversos análisis propuestos aquí, para que el lector pueda aplicarlo en su catedra en caso de interés.

Es importante transmitir que los datasets de los datos recolectados se encuentren en formato csv ya que esto facilita y optimiza los recursos disponibles para el trabajo presentado. A modo de observación a la hora de presentar resultados se debe tener en cuenta detalles como el usar librerías y funciones de visualización para personas daltónicas, como puede ser viridis.

Además, las metodologías aplicadas nos permitieron un análisis completo para una primera instancia, a la hora de medir las competencias mencionadas en la asignatura. Sin embargo, nos proponemos seguir explorando diferentes métricas e indicadores que permitan alcanzar el más alto nivel de madurez. Entre ellas la ponderación de los diferentes objetivos alcanzados por cada estudiante basados en rúbricas futuras para la definición de los indicadores mencionados, esto propone un caso de estudio interesante como oportunidad de mejora. También analizar a futuro otras herramientas que permitan la integración con otros sistemas que contamos en la actualidad.

Por último, analizar a futuro, en caso de interés por parte de otras cátedras, planes de capacitaciones en el uso de ciencia de datos para medir competencias o los objetivos en que puedas sumar estas.

## 4. REFERENCIAS.

### BIBLIOGRAFÍA


Acuña, E. G. (2023). Fortaleciendo la enseñanza de ingeniería en Educación Superior. Actualización docente en minería de datos, internet de las cosas y metaversos. *Congreso De Docencia En Educación Superior CODES, 5*, 1-4. doi:https://doi.org/10.15443/codes2044

Argentina. (1 de Diciembre de 2019). *LEY DE EDUCACIÓN SUPERIOR*. Obtenido de LEY DE EDUCACION SUPERIOR: http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/25000-29999/25394/texact.htm

Aubin, V. I., Bellani, M. E., B. L., Fernández, T. E., & Guatelli, R. S. (2017). *Influencia de la educación inversa en el aprendizaje y adquisición de competencias .* San Justo: Universidad Nacional de La Matanza. Obtenido de https://repositoriocyt.unlam.edu.ar/handle/123456789/556

Ayankoya, K., Calitz, A., & Greyling, J. (2014). Intrinsic Relations between Data Science, Big Data, Business Analytics and Datafication. *SAICSIT Conference'14* (págs. 1-7). Centurion South Africa: ACM. doi:1-58113-000-0/00/0010

Barba Maggi, L., Molina Granja, F., Molina Valdiviezo, L., & Granda, W. B. (2023). *Formación en Ciencias de Datos, una necesidad actual.* Riobamba, Ecuador: Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH). doi:https://doi.org/10.37135/u.editorial.05.100

Berinato, S. (2 de Enero de 2019). *hbr*. Obtenido de Harvard Business Review: https://hbr.org/2019/01/data-science-and-the-art-of-persuasion

Brangold, M. (2022). *Situación actual de la Capacitación en Competencias de los Profesores que se desempeñan en la Carrera de Medicina del Departamento de Salud de la Universidad Nacional de La Matanza. .* San Justo: Universidad Nacional de La Matanza.[Tesis de Maestría en Gestión de la Educación Superior de la Universidad Nacional de La Matanza].

Bravo, B., Montero, M., Juárez, M., & Solari, F. (Diciembre de 2021). Desarrollo de la competencia de resolución de problemas ingenieriles en clases de Física. *REVISTA ELECTRÓNICA DE INVESTIGACIÓN EN EDUCACIÓN EN CIENCIAS, XVI*(2), 1-17.

Breiman, L. (August de 2001). Statistical Modeling: The Two Cultures (with comments and a rejoinder by the author). *Statistical Science, III*(16), 199-231. doi:10.1214/ss/1009213726

Cleveland, W. (March de 2001). Data Science: An Action Plan for Expanding the Technical Areas of the Field of Statistics. *International Statistical Review, I*(69), 21-26. doi:10.1111/j.1751-5823.2001.tb00477.x

Conde, S. D., & Igarza, A. S. (2017). Descubriendo competencias a través de una experiencia de aprendizaje invertido en programación en la Universidad Nacional de La Matanza. *Reddi: Revista Digital del Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas de la Universidad Nacional de La Matanza, II*(1), 1-11.

Conde, S. D., Igarza, A. S., & Vera, A. F. (2018). Identificación y evaluación de competencias centrada en el alumno en Asignatura Gestión Organizacional de la Universidad Nacional de la Matanza. *REDDI: Revista Digital del Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas,, III*(2), 1-12.

Conde, S. D., Lasso, M., & Igarza, S. (Diciembre de 2020). Evaluación de Competencias en Ingenierías y Licenciaturas en Docentes Universitarios. *REDDI, V*(2), 1-10.

CONFEDI. (2006). *Primer acuerdo sobre competencias genéricas. 3er. Taller sobre desarrollo de competencias en la enseñanza de la ingeniería argentina, Experiencia Piloto en las terminales de Ing. Civil, Electrónica, Industrial, Mecánica y Química.* Villa Carlos Paz, Córdoba.: CONFEDI. Obtenido de http://www.uncaus.edu.ar/images/Academica/Acreditacion/8-Competencias_CONFEDI.pdf

CONFEDI. (2014). *Competencias en ingenieria.* Mar de Plata: Universidad FASTA.

CONFEDI. (2018). *Libro Rojo de CONFEDI. Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de Carreras de Ingeniería en la República Argentina.* Rosario: CONFEDI. Obtenido de https://confedi.org.ar/download/documentos_confedi/LIBRO-ROJO-DE-CONFEDI-Estandares-de-Segunda-Generacion-para-Ingenieria-2018-VFPublicada.pdf

D´Onofrio, M. V., & Morcela, O. A. (Mayo de 2022). Evaluación de competencias en tiempos de pandemia: aprendizaje autónomo. *Boletín SIED*(5), 17-29.

De Vedia, L. A. (1 de Mayo de 2023). *Asociación Argentina para el progreso de las Ciencias.* Obtenido de Asociación Argentina para el progreso de las Ciencias.: https://aargentinapciencias.org/semblanza-de-carlos-lerch/

Dhar, V. (2013). Data Science and Prediction. *Communications of the ACM, 56*(12), 64-73. doi:10.1145/2500499

Fawcett, T., & Provost, F. (2013). *Data Science for Business.* Gravenstein Highway North: O'Reilly Media, Inc.

Fitzsimmons, J. A., & Fitzsimmons, M. J. (2011). *Service management: operations, strategy, information technology.* New York: The McGraw-Hill.

Fontalvo-Herrera, T. J., Delahoz, E. J., & Mendoza-Mendoza, A. A. (2018). Aplicación de Minería de Datos para la Clasificación de Programas Universitarios de Ingeniería Industrial Acreditados en Alta Calidad en Colombia. *Información Tecnológica, XXIII*(3), 89-96.

Fulugonio, M. J. (2014). Pensar la educación en términos de competencias. *Revista De Investigación Del Departamento De Humanidades Y Ciencias Sociales, I*(45), 41-46. Obtenido de Recuperado a partir de //rihumso.unlam.edu.ar/index.php/humanidades/article/view/47

García, R. (2006). *Sistemas Complejos-Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria.* Barcelona: Gedisa, S.A.

Giama, E., & Papadopoulos, A. (2016). Carbon footprint analysis as a tool for energy and environmental management in small and medium-sized enterprises. *International Journal of Sustainable Energy, 37*(1), 21-29. doi:10.1080/14786451.2016.1263198

Gon, F., & Agosta, R. (2020). Método alternativo de evaluación por competencias en alumnos de Física en carreras de Ingeniería. *REVISTA DE ENSEÑANZA DE LA FÍSICA, XXXII*(Extra), 163-170.

González, M. N., & Andrada, M. J. (2024). La formación por competencias en estudiantes. Una relación del aseguramiento de la calidad en ingeniería industrial de la Universidad Nacional de La Rioja. *Revista RAES, XVI*(28), 79-97.

Guisado López, G. (03 de Junio de 2019). Introducción a la ciencia de datos en la Ingeniería Industrial. *Trabajo Fin de Grado: Introducción a la ciencia de datos en la Ingeniería Industrial*. Leganés, Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.

Han, J., Kamber, M., & Jian, P. (2012). *Data Mining: Concepts and Techniques* (Tercera ed.). Waltham: Morgan Kaufmann Publishers.

Igarza, A. S. (2018). Aprendizaje por competencias, un nuevo viejo enfoque. *Reddi: Revista Digital del Departamento de Ingeniería, 3*(1), 1-6.

ITBA. (18 de Agosto de 2025). *itba.edu.ar.* Obtenido de itba.edu.ar: https://www.itba.edu.ar/wp-content/uploads/2023/05/Plan-de-estudio-Ing.-Industrial-2023.pdf

Jeandet, V. P. (2023). *Análisis del currículo de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de La Matanza, considerando la evaluación por competencias.* San Justo: [Tesis de Maestría en Gestión de la Educación Superior de la Universidad Nacional de La Matanza]. Repositorio Digital UNLaM. Obtenido de https://repositoriocyt.unlam.edu.ar/handle/123456789/1848

Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review andrecent developments. *Phil. Trans. R. Soc. A 374:20150202*, 1-16.

Juarez, M. A., Palomo, M., & Aldo, S. (2017). Ingenieros con ingenio: una visión hacia el modelo de Competencias propuesto por el CONFEDI. *1er. Congreso Latinoamericano de Ingeniería (CLADI)*, 1-4.

Laudon, K. C., & Laudon, J. P. (2024). *Sistemas de Información Gerencial* (Decimoquinta ed.). México: Pearson. Recuperado el 01 de Mayo de 2025

Le Boterf, G. (2001). *Ingeniería de las competencias* (Primera ed.). Barcelona: Gestión 2000.

Lovelook, C., Reynoso, J., D Andrea, G., Huete, L., & Wirtz, J. (2018). *Administración de Servicios* (Tercera ed.). México: Pearson Educación.

Naur, P. (1974). *Concise survey of computer methods.* New York: Petrocelli Books.

O'Neil, C., & Schutt, R. (2013). *Doing Data Science: Straight Talk from the Frontline* (Primera ed.). Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc.

Ormart, E. B., Brunetti, J., Fernández, S. C., & Esteva, P. (2013). Las competencias éticas en los estudiantes universitarios. *RInCE, IV*(7), 1-15.

Pérez, S. N., Aubin, V. I., Cabrera, J. l., García, G. A., Goitea, A. O., Lanzillota, H., . . . Gasior, F. (2021). *Visualización de adquisición de competencias en entornos gamificados (Informe C-233).* San Justo: Universidad Nacional de La Matanza. Obtenido de https://repositoriocyt.unlam.edu.ar/handle/123456789/1999

Pérez, S. N., Aubin, V. I., Cabrera, J. L., García, G. A., Goitena, A., Lanzillota, H., . . . Gasior, F. (2023). Visualización de adquisición de competencias en entornos gamificados. *En B.L. Donadello Anadón (Comp.). IV Encuentro MEP del DIIT-UNLaM* (págs. 13-15). San Justo: Universidad Nacional de La Matanza.

Perrenoud, P. (2004). *Diez nuevas competencias para enseñar, Invitación al viaje.* Barcelona: Graõ.

Porven Rubier, J., & Méndez, N. P. (2018). Ciencia de datos: una revisión del estado del arte. *UCE Ciencia. Revista de postgrado, 6*(3), 1-10.

Ryckeboer, H. E., Spositto, O. M., Castro, H. M., Matteo, L. R., Barone, M. A., Etcheverry, M. E., & Bossero, J. C. (1 de Enero de 2014). *Implementación de un data warehouse para la toma de decisiones en el área académica. Web.* Obtenido de repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar: https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/RDUNLAM_7c60af98eb2a4e54e1414264aeb7be5c

SIU. (01 de Agosto de 2023). *SIU*. Obtenido de SIU: https://www.siu.edu.ar/

Toffler, A. (1980). *La Tercera Ola.* Barcelona: Plaza & James SA.

Tukey, J. W. (Mar de 1962). The Future of Data Analysis. *Institute of Mathematical Statistics, XXXIII*(1), 1-67.

UA. (18 de Agosto de 2025). *austral.edu.ar.* Obtenido de austral.edu.ar: https://www.austral.edu.ar/productos-austral/pilar/ingenieria-industrial/

UBA. (18 de Agosto de 2025). *fi.uba.ar.* Obtenido de FIUBA: https://cms.fi.uba.ar/uploads/RESCS_2024_63_Industrial_Plan_2023_Modificacion_b6f5d44f65_7e4ff9c5bb.pdf

UNGS. (18 de Agosto de 2025). *ungs.edu.ar.* Obtenido de ungs.edu.ar: https://www.ungs.edu.ar/carrera/ingenieria-industrial

Van der Aalst, W. (2016). *Process Mining: Data Science in Action.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Vega Vargas, J. (2020). Editorial: Data, Science and Engineering. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, XXVIII*(1), 2-3.

**Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad Nacional de la Matanza, al Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas y la coordinación de Ingeniería Industrial.

# ANÁLISIS DE RESULTADOS DE APRENDIZAJE EN ANÁLISIS NUMÉRICO Y CÁLCULO AVANZADO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Rodríguez, Georgina B.; Laugero, Lorena F.; Martí, Fernando L.

*Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional*
*grodriguez@frsn.utn.edu.ar; llaugero@frsn.utn.edu.ar; fmarti@frsn.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

El enfoque por competencias requiere evidencias concretas sobre el desempeño del estudiante, lo que implica no sólo aplicar instrumentos de evaluación adecuados, sino también examinar en profundidad los datos que éstos generan. A partir de este estudio, podría ser posible establecer si los estudiantes logran integrar los conocimientos teóricos con el saber hacer.

Un análisis basado en datos permite, por un lado, detectar patrones de logro y dificultades en el grupo, y por otro, ajustar las estrategias didácticas y metodológicas, promoviendo una enseñanza más alineada con los resultados esperados. Además, contribuye a evaluar la pertinencia de las herramientas tecnológicas y de los entornos de aprendizaje utilizados.

El presente trabajo expone un avance del trabajo llevado a cabo en la asignatura Análisis Numérico y Cálculo Avanzado, correspondiente a la carrera de Ingeniería Industrial de la Facultad Regional San Nicolás de la Universidad Tecnológica Nacional. Como parte de las tareas del proyecto de investigación "Herramientas para el seguimiento de resultados de aprendizaje", se está trabajando en el diseño de un tablero para analizar el logro de los resultados de aprendizaje propuestos, a partir del procesamiento de datos obtenidos en diversas instancias de evaluación.

**Palabras Claves:** evaluación, resultados de aprendizaje, análisis de datos

**ABSTRACT**

The competency-based approach requires concrete evidence of student performance, which implies not only applying appropriate assessment tools but also examining in depth the data they generate. Based on this study, it may be possible to determine whether students are able to integrate theoretical knowledge with practical skills.

A data-based analysis makes it possible, on the one hand, to identify patterns of achievement and difficulties within the group, and on the other, to adjust teaching and methodological strategies, fostering a teaching process more closely aligned with the expected outcomes. In addition, it contributes to evaluating the relevance of the technological tools and learning environments used.

This paper presents progress on the work carried out in the course *Numerical Analysis and Advanced Calculus*, which is part of the Industrial Engineering program at the Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional. As part of the research project *"Tools for Monitoring Learning Outcomes"*, efforts are being made to design a dashboard to analyze the achievement of the proposed learning outcomes, based on the processing of data obtained from various assessment instances.

**Keywords:** assessment, learning outcomes, data analysis.

## 1. INTRODUCCIÓN.

La educación superior enfrenta el desafío de formar profesionales capaces de desenvolverse en contextos complejos, cambiantes y multidisciplinarios. En particular, los programas de Ingeniería requieren enfoques pedagógicos que aseguren una formación integral, contextualizada y orientada a resultados. En este marco, el enfoque basado en competencias se ha consolidado como un paradigma formativo que articula saberes técnicos con habilidades, actitudes y valores esenciales para el ejercicio profesional en entornos dinámicos (Monti y Maurel, 2023; Menzala-Peralta y Ortega-Menzala, 2023)

A nivel nacional, el Libro Rojo del CONFEDI (2018) establece estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería, promoviendo un aprendizaje centrado en el estudiante y una formación alineada con las demandas del entorno profesional. Este modelo fue aplicado por la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), en la reforma curricular realizada en 2022, donde se establecieron nuevos diseños curriculares para todas las carreras de grado, incorporando competencias genéricas y específicas en los planes de estudio.

En este marco, los resultados de aprendizaje se definen como expresiones observables y medibles de lo que se espera que el estudiante logre al finalizar un proceso formativo. Su correcta formulación y seguimiento permiten garantizar la coherencia entre los objetivos curriculares, las estrategias de enseñanza y las necesidades del entorno productivo (Gómez Urquizo, 2018). Además, constituyen una herramienta clave para la evaluación continua y para la mejora de programas académicos.

Uno de los desafíos persistentes en la implementación de este enfoque radica en cómo realizar el seguimiento de los resultados de aprendizaje. Por lo tanto, es fundamental disponer de herramientas sistemáticas para monitorear y analizar evidencias del logro de los mismos. En este sentido, la incorporación de tecnologías de visualización de datos, como tableros en Excel, o Power BI, ha demostrado ser una estrategia eficaz para representar el progreso académico de los estudiantes, identificar patrones de desempeño y facilitar la toma de decisiones pedagógicas (Caballero Camargo, 2024).

El uso de tableros interactivos permite a docentes y gestores visualizar el logro progresivo de los resultados de aprendizaje, tanto a nivel individual como grupal, promoviendo una cultura de mejora continua y retroalimentación efectiva. Estas herramientas, integradas en plataformas como Canvas LMS, permiten vincular actividades evaluativas con los resultados esperados, generando información valiosa para el análisis y la planificación educativa (Caballero Camargo, 2024).

En esta línea, el proyecto de investigación “Herramientas para el seguimiento de resultados de aprendizaje” (PID SNTEEC306), desarrollado por el Grupo Ingeniería & Educación en 2025, tiene como objetivo diseñar e implementar tableros de visualización que permitan representar indicadores de desempeño en algunas cátedras. A partir del análisis de las evaluaciones realizadas y su correspondencia con los resultados esperados, se busca optimizar los procesos de retroalimentación docente y fortalecer la toma de decisiones basada en datos. (Marzano, 2003; Shavelson, 2007).

Este trabajo presenta los avances realizados en la asignatura Análisis Numérico y Cálculo Avanzado, correspondientes al tercer año de la carrera de Ingeniería Industrial en la Facultad Regional San Nicolás de la UTN. El análisis se centra en las evaluaciones parciales del primer cuatrimestre de la materia, explorando la correspondencia entre los desempeños observados y los resultados de aprendizaje planteados.

## 2. MARCO TEÓRICO.

El enfoque por competencias se ha consolidado como una estrategia pedagógica que busca articular la formación académica con las demandas del mundo laboral. Este modelo promueve el desarrollo de habilidades, conocimientos, actitudes y valores que permiten a los estudiantes desempeñarse eficazmente en contextos reales y cambiantes.

A diferencia de los modelos tradicionales centrados en contenidos, el enfoque por competencias se orienta hacia el **saber hacer**, el **saber ser** y el **saber convivir**, integrando dimensiones cognitivas, procedimentales y actitudinales. Esto implica una transformación profunda en los métodos de enseñanza, evaluación y diseño curricular.

En el enfoque por competencias, la evaluación ocupa un lugar central, ya que permite vincular el aporte de cada asignatura a la matriz de tributación de la carrera, de donde se derivan las competencias específicas a desarrollar y, en consecuencia, los resultados de aprendizaje esperados. Estos resultados

constituyen el eje orientador del proceso formativo y deben guiar tanto la planificación como la evaluación.

Un instrumento particularmente valioso en este contexto son las rúbricas, dado que ofrecen una descripción clara y estructurada de los criterios de evaluación, junto con los distintos niveles de logro posibles. Esto proporciona al estudiante una comprensión precisa de los objetivos a alcanzar, le permite identificar su nivel de desempeño y orienta sus acciones para la mejora continua. Además, las rúbricas facilitan al docente el análisis de los aprendizajes obtenidos y la detección de dificultades recurrentes en el grupo de estudiantes. Más allá de su función evaluativa, las rúbricas también promueven el desarrollo de la autorregulación en los estudiantes, al hacer explícitas las expectativas y brindar referencias concretas para el progreso individual (Andrade, 2005).

En este contexto, el uso de tableros se presenta como una herramienta estratégica para el seguimiento sistemático de los resultados de aprendizaje. Esta herramienta permite visualizar de manera clara y dinámica el nivel de logro alcanzado por los estudiantes en relación con los resultados esperados, a partir de la integración de datos provenientes de rúbricas de evaluación. Tal como lo muestra Caballero Camargo (2024), la implementación de tableros interactivos en entornos virtuales como Canvas, combinados con herramientas de visualización como Power BI, facilita tanto a docentes como a estudiantes el monitoreo continuo del desempeño, promoviendo una cultura de mejora continua. Esta visualización no solo permite identificar logros y dificultades individuales o grupales, sino que también fortalece la toma de decisiones pedagógicas basadas en evidencia, alineadas con las competencias del perfil de egreso.

## 3. DESARROLLO

### 3.1 Metodología

El presente trabajo se enmarca en una metodología de investigación-acción, dado que combina la recolección y análisis sistemático de datos con la implementación de estrategias pedagógicas orientadas a la mejora continua.

Tal como señala (Elliot, 2000), la investigación-acción implica un proceso cíclico de planificación, acción, observación y reflexión, orientado a transformar la práctica educativa desde dentro, mediante la participación activa de los docentes en la generación de conocimiento sobre su propia labor.

En este caso, el equipo docente diseñó instrumentos de evaluación alineados con los resultados de aprendizaje esperados, sistematizó los datos obtenidos en instancias parciales, y desarrolló un tablero interactivo para visualizar el desempeño estudiantil.

### 3.2. Organización de la información.

En el año 2025 se implementó el nuevo plan de estudio de la carrera. Las dos evaluaciones del primer cuatrimestre fueron diseñadas en función de los resultados de aprendizaje establecidos en el Syllabus, teniendo en cuenta cómo la materia aporta a la matriz de tributación en las competencias genéricas y específicas de la carrera (CS UTN Ord. 1908, 2022). En dichas evaluaciones se incluyeron los temas dados en la primera mitad del año, según estaba planificado.

Se estableció una rúbrica común para la corrección de todas las actividades propuestas, a fin de que el equipo docente cuente con un criterio uniforme, tal como se presenta en la Tabla 1.

*Tabla 1 Rúbrica general para la corrección.*

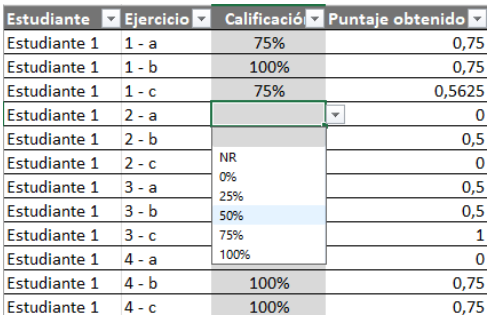
| | **Criterio** |
|---|---|
| NR | No resuelve la consigna |
| 0% | La respuesta no corresponde a la consigna |
| 25% | Desarrollo pobre, apenas menciona fórmulas o conceptos teóricos |
| 50% | Desarrollo con algún error de importancia |
| 75% | Desarrollo con algún error de poca importancia |
| 100% | Desarrollo correcto |

Además, se estableció el puntaje para las actividades planteadas en el primer parcial, de acuerdo con indicado en la Tabla 2.

*Tabla 2 Escala de puntaje actividades primera evaluación parcial.*

| **Ejercicio** | **1a** | **1b** | **1c** | **2a** | **2b** | **2c** | **3a** | **3b** | **3c** | **4a** | **4b** | **4c** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Puntaje** | 1 | 0,75 | 0,75 | 1 | 0,5 | 1 | 1 | 0,5 | 1 | 1 | 0,75 | 0,75 |

Utilizando las Tablas 1 y 2 se diseñó una planilla de cálculo en Excel para cargar los resultados obtenidos por los estudiantes en cada actividad de la primera evaluación, como se muestra en la Figura 1, con un ejercicio por fila, por estudiante, con filtros para hacer más sencilla la carga. Allí, el docente responsable del proceso de corrección debía seleccionar por cada estudiante y por cada actividad, de una lista desplegable que muestra los valores posibles a cargar, según la Tabla 1, la calificación asignada. Automáticamente, en la columna de la derecha se calcula el puntaje obtenido en cada ejercicio, de acuerdo con los valores indicados en la Tabla 2.



| Estudiante | Ejercicio | Calificació | Puntaje obtenido |
|---|---|---|---|
| Estudiante 1 | 1 - a | 75% | 0,75 |
| Estudiante 1 | 1 - b | 100% | 0,75 |
| Estudiante 1 | 1 - c | 75% | 0,5625 |
| Estudiante 1 | 2 - a | | 0 |
| Estudiante 1 | 2 - b | | 0,5 |
| Estudiante 1 | 2 - c | | 0 |
| Estudiante 1 | 3 - a | | 0,5 |
| Estudiante 1 | 3 - b | | 0,5 |
| Estudiante 1 | 3 - c | | 1 |
| Estudiante 1 | 4 - a | | 0 |
| Estudiante 1 | 4 - b | 100% | 0,75 |
| Estudiante 1 | 4 - c | 100% | 0,75 |



*Figura 1 Planilla de cálculo donde se carga la calificación de cada ejercicio en la primera evaluación parcial.*

Una vez finalizada la carga de la planilla con las calificaciones de todos los estudiantes en cada ejercicio, mediante una tabla dinámica elemental se obtiene la nota final de la evaluación para todos los alumnos, redondeando el valor al entero más próximo en una columna extra, como se muestra en la Figura 2.

| Suma de Puntaje o | Ejerci | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Estudiante | 1 - a | 1 - b | 1 - c | 2 - a | 2 - b | 2 - c | 3 - a | 3 - b | 3 - c | 4 - a | 4 - b | 4 - c | Total general | NOTA |
| Estudiante 1 | 0,75 | 0,75 | 0,5625 | 0 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0 | 0,75 | 0,75 | 6,0625 | 6 |
| Estudiante 2 | 0,25 | 0,75 | 0,5625 | 0,75 | 0,5 | 1 | 1 | 0,5 | 0,25 | 1 | 0,75 | 0,75 | 8,0625 | 8 |
| Estudiante 3 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 1 | 0,5 | 0,75 | 1 | 0,5 | 1 | 0 | 0,75 | 0,75 | 8,5 | 9 |
| Estudiante 4 | 0,25 | 0,75 | 0,75 | 1 | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0,75 | 0,75 | 8,25 | 8 |
| Estudiante 5 | 0 | 0,75 | 0,5625 | 1 | 0,5 | 1 | 1 | 0,5 | 1 | 0,25 | 0,75 | 0,75 | 8,0625 | 8 |
| Estudiante 6 | 1 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0 | 0 | 0,75 | 7 | 7 |

*Figura 2 Tabla dinámica que calcula la nota final de cada estudiante en la primera evaluación*

Para la segunda evaluación se elaboró la tabla de puntajes correspondiente a cada actividad, tal como se muestra en la Tabla 3,

*Tabla 3 Escala de puntaje actividades segunda evaluación parcial.*

| **Ejercicio** | **1a** | **1b** | **2a** | **2b** | **2c** | **2d** | **3a** | **3b** | **4a** | **4b** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Puntaje** | *1,5* | *1* | *0,625* | *0,625* | *0,625* | *0,625* | *2* | *0,5* | *1,25* | *1.25* |

A partir de los datos de la Tabla 3 y la Tabla 1, se diseñó una planilla de cálculo que permitió registrar los resultados obtenidos por los estudiantes en cada actividad de la segunda evaluación, análoga a la

mostrada en la Figura 1. Posteriormente, se generó una tabla dinámica, similar a la de la Figura 1, con el fin de calcular el puntaje de cada estudiante en esta evaluación.

Cabe destacar que, hasta este punto sólo se obtuvieron los resultados finales de las evaluaciones, acción que podría haberse logrado mediante una tabla de doble entrada, de carga más sencilla.

Sin embargo, el interés va más allá de la presentación de las notas obtenidas, ya que se pretende analizar cuestiones en particular, por criterios de evaluación y a través del tiempo. Para ello, se unificaron las Tablas 2 y 3 de los puntajes asignados a las actividades de cada evaluación, recodificando y agregando información sustancial para el análisis posterior. En la Tabla 4 se muestra esta unificación, donde se puede apreciar que, en cada fila, además de la codificación de la actividad y el puntaje asignado, se especifica la instancia evaluativa, el tema (cada evaluación abarcó dos temas), el objetivo de la actividad, y el criterio a evaluar.

Con esta información sobre cada actividad planteada en las evaluaciones, es posible hacer un análisis más exhaustivo del desempeño de los estudiantes, ya sea en forma grupal o individual.

*Tabla 4 Unificación de las tablas de puntajes y agregado de información.*

| Ejercicio | Parcial | TEMA | Actividad | Criterio a evaluar | Puntaje |
|---|---|---|---|---|---|
| P1-1a | P1 | ENL | ap. mét. Secante | aplicación de método | 1 |
| P1-1b | P1 | ENL | cond. mét. Reg. Falsi | condiciones N, S y NyS | 0,75 |
| P1-1c | P1 | ENL | Regla de Fourier | condiciones N, S y NyS | 0,75 |
| P1-2a | P1 | SEL | cond. mét. SEL | condiciones N, S y NyS | 1 |
| P1-2b | P1 | SEL | mét. directo más eficiente | eficiencia | 0,5 |
| P1-2c | P1 | SEL | ap mét. más eficiente | aplicación de método | 1 |
| P1-3a | P1 | SEL | cond. mét. Iterativos | condiciones N, S y NyS | 1 |
| P1-3b | P1 | SEL | mét. más eficiente | eficiencia | 0,5 |
| P1-3c | P1 | SEL | ap mét más eficiente | aplicación de método | 1 |
| P1-4a | P1 | ENL | Int. geométrica Método Newton | Redacción - concepto | 1 |
| P1-4b | P1 | ENL | velocidad conv. Raíces dobles | Redacción - concepto | 0,75 |
| P1-4c | P1 | ENL | Sel. método que garantice conv. | Redacción - concepto | 0,75 |
| P2-1a | P2 | IN | problema | aplicación de método | 1,5 |
| P2-1b | P2 | IN | ¿valor exacto? | precisión | 1 |
| P2-2a | P2 | IN | igual o aprox. | precisión | 0,625 |
| P2-2b | P2 | IN | igual o aprox. | precisión | 0,625 |
| P2-2c | P2 | IN | igual o aprox. | precisión | 0,625 |
| P2-2d | P2 | IN | igual o aprox. | precisión | 0,625 |
| P2-3a | P2 | AJ-C | problema | aplicación de método | 2 |
| P2-3b | P2 | AJ-C | aplicación de fórmula | uso del método | 0,5 |
| P2-4a | P2 | AJ-C | concepto error | Redacción - concepto | 1,25 |
| P2-4b | P2 | AJ-C | concepto error | Redacción - concepto | 1,25 |

Se muestran, como ejemplo, en las Figuras 3 y 4 algunas de las actividades planteadas en las evaluaciones.

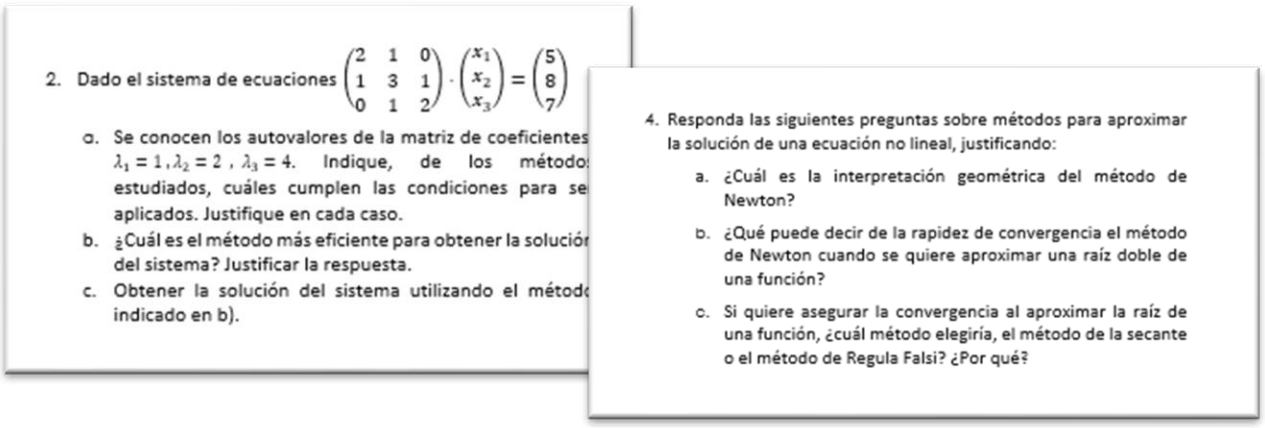



*Figura 3 Algunas de las actividades del primer parcial*

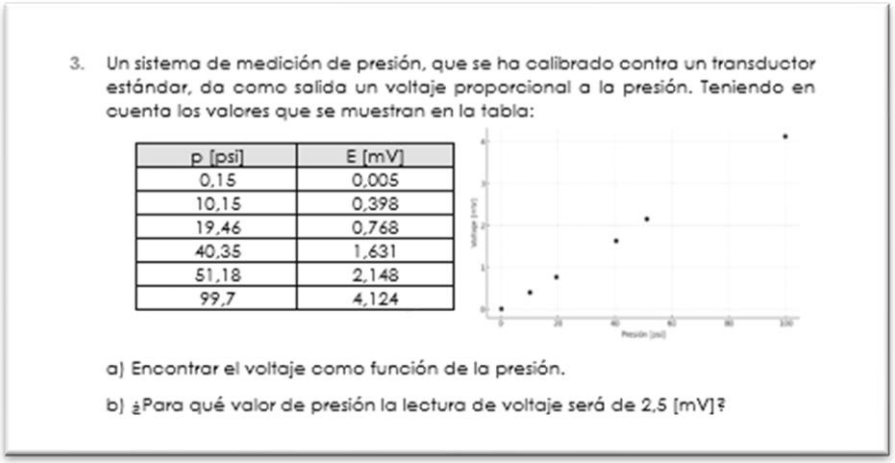



*Figura 4 Actividad propuesta en el segundo parcial*

### 3.2. Tablero.

El tablero obtenido con la información recabada hasta el momento se presenta en la Figura 5, donde se resumen los resultados de los primeros dos parciales, presentando en forma de barras acumuladas las distintas calificaciones obtenidas, a la izquierda por habilidades y a la derecha por actividad.

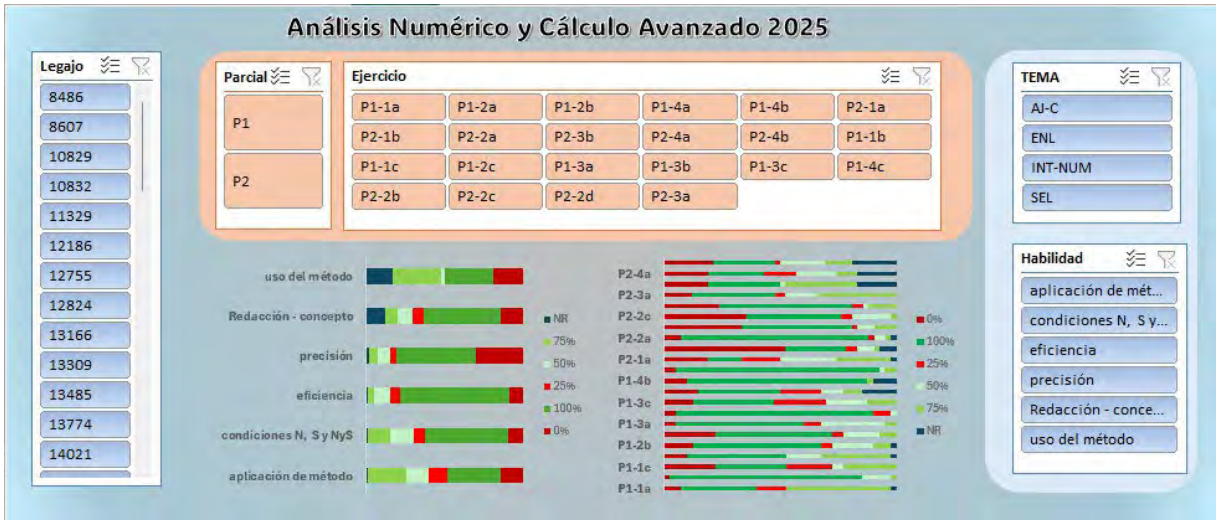



*Figura 5. Tablero al finalizar el primer cuatrimestre*

En los gráficos, el color azul se empleó para representar las actividades no resueltas; los tonos de rojo, para los porcentajes de 0 % y 25 %; y los tonos de verde, de más claro a más oscuro, para las calificaciones de 50 %, 75 % y 100 %.

Los segmentadores permiten filtrar la información según lo que se quiera mostrar en los gráficos. Por ejemplo, se puede elegir un parcial determinado, actividades concretas, temas o habilidades específicas. Además, es posible visualizar el desempeño de cada alumno.

En la figura 6 se muestran, como ejemplo, los resultados de la habilidad “aplicación de métodos” en el tema “sistemas de ecuaciones lineales”, vinculada al primer parcial.

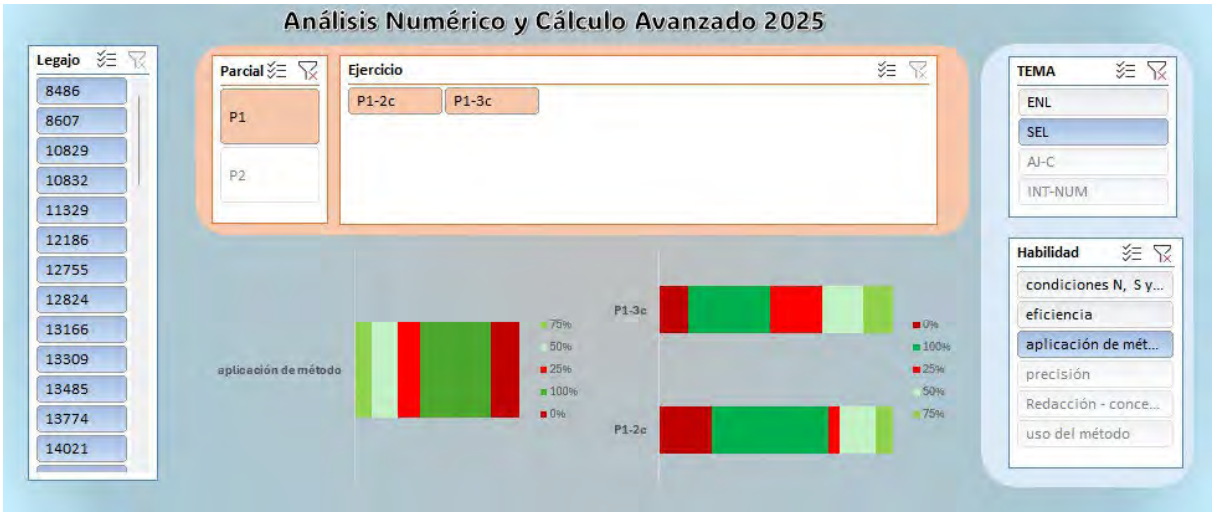



*Figura 6. Aplicación de filtros al tablero*

## 4. CONCLUSIONES.

La adopción de un enfoque basado en competencias en la formación de ingenieros supone una transformación profunda de las prácticas pedagógicas, orientando el proceso educativo hacia el desarrollo integral de capacidades que integren conocimientos, habilidades y actitudes. En este marco, la experiencia llevada a cabo en la asignatura Análisis Numérico y Cálculo Avanzado representa un primer avance en la construcción de estrategias de evaluación coherentes con este paradigma. Esto se logró mediante la formulación explícita de resultados de aprendizaje, la definición de criterios de evaluación asociados y el diseño de instancias que permiten evidenciar el nivel de logro alcanzado por los estudiantes.

La metodología empleada favoreció la objetividad y la transparencia en la calificación, además de aportar información valiosa para retroalimentar el proceso de aprendizaje. El registro y sistematización de los datos obtenidos posibilita un análisis automatizado que servirá como base para el desarrollo de herramientas que apoyen la toma de decisiones docentes fundamentadas en evidencia, en un proceso que actualmente se encuentra en etapa de desarrollo.

Esta iniciativa se enmarca en los lineamientos institucionales de la UTN, que promueve la mejora continua de la calidad educativa y la adecuación de las prácticas docentes a los nuevos planes de estudio y a las demandas del contexto profesional. En consonancia con los objetivos estratégicos definidos por la institución, se proyecta continuar con el análisis longitudinal de los datos generados, incorporando variables que permitan estudiar la influencia del enfoque por competencias en el rendimiento académico, la permanencia y la trayectoria de los estudiantes.

Con el objetivo de contar con una visión integral del desempeño estudiantil a lo largo del cursado, se continuará anexando la información correspondiente a las futuras instancias de evaluación. Esto permitirá enriquecer el tablero con datos actualizados y completar el panorama de logros y dificultades, facilitando un análisis más profundo al finalizar la asignatura. La incorporación progresiva de estos registros fortalecerá la utilidad del tablero como herramienta de seguimiento, retroalimentación y toma de decisiones pedagógicas basadas en evidencia.

## 5. REFERENCIAS.


Andrade, H. G. (2005). Teaching With Rubrics: The Good, the Bad, and the Ugly. *College Teaching, 53*(1), 27-31. doi:https://doi.org/10.3200/CTCH.53.1.27-31

Caballero Camargo, C. D. (2024). *Tableros de Analítica de aprendizaje para LMS Canvas – Seguimiento al Logro de los Resultados de Aprendizaje.* Tesis de Maestría en Gestión, Aplicación y Desarrollo de Software. Universidad Autónoma de Bucaramanga. Bogotá

Elliott, J. (1993). *La investigación-acción en educación*. Morata.

Gómez Urquizo, H. (2018). Propuesta de medición y evaluación de Resultados de Aprendizaje según criterios de ABET y ASIIN. *16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Innovation in Education and Inclusion".* Obtenido de https://laccei.org/LACCEI2018-Lima/full_papers/FP435.pdf

Marzano, R. J. (2003). *What works in schools: Translating research into action*. ASCD.

Menzala-Peralta, C. C., & Ortega-Menzala, E. (2023). Evaluación basada en competencias en educación superior. *Revista de Investigación en Ciencias de la Educación, Horizontes, 7*(28), 836-851. doi:https://doi.org/10.33996/revistahorizontes.v7i28.558

Monti, C., & Maurel, M. (2023). *Actas VIII Jornadas Nacionales y Vi Latinoamericanas de Investigadorxs en Formación en Educación / IICE.* Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires.

Shavelson, R. J. (2007). *A brief history of student learning assessment: How we got where we are and a proposal for where to go next*. Stanford University.

# INTEGRACIÓN DE PERFILES DE INVERSIÓN EMPRESARIAL EN LA ENSEÑANZA DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS: UNA PROPUESTA METODOLÓGICA BASADA EN EVIDENCIA EMPÍRICA

Gei, Anabella; García, Alejandra

*Departamento de Tecnología, Universidad Nacional de Luján.*
*anabellagei@gmail.com; alejandraivana.garcia@gmail.com*

**RESUMEN**

La enseñanza de evaluación de proyectos presenta una desconexión entre modelos teóricos de tasa de corte y la realidad empresarial. Los estudiantes aprenden métodos sin contexto sobre cómo las empresas determinan estas tasas según su perfil de riesgo y características organizacionales.

Esta investigación propone desarrollar una guía metodológica que permita identificar perfiles de inversión empresarial y seleccionar tasas coherentes con escenarios realistas. La metodología se basa en encuesta estructurada a graduados de ingeniería industrial, relevando tasas utilizadas en sus organizaciones y criterios de determinación. El estudio caracteriza perfiles de inversión (conservador, moderado, agresivo) según variables como sector, tamaño empresarial, estructura de capital y tolerancia al riesgo. Posteriormente, se asocian las tasas con modelos teóricos específicos estableciendo correlaciones entre perfil empresarial y metodología.

Los resultados permitieron desarrollar una herramienta pedagógica que contextualice la evaluación de proyectos, facilitando que los estudiantes comprendan la variabilidad de criterios según el contexto empresarial. Esta aproximación fortalece la formación práctica al vincular conocimientos teóricos con evidencia empírica del mercado laboral. Se espera que la implementación de esta guía mejore la calidad del aprendizaje en evaluación de proyectos, preparando profesionales más conscientes de la complejidad decisional en contextos empresariales reales.

**Palabras Claves:** Evaluación de proyectos - Tasa de corte - Perfil de inversión - Enseñanza de la ingeniería - Enseñanza situada

**ABSTRACT**

The teaching of project evaluation often reveals a disconnect between theoretical models of discount rates and real-world business practices. Students learn financial methods without contextual understanding of how companies determine their required rate of return based on risk profiles and organizational characteristics.

This research proposes the development of a methodological guide to help identify business investment profiles and select discount rates consistent with realistic scenarios. The methodology is based on a structured survey conducted among Industrial Engineering graduates, gathering data on the discount rates used in their organizations and the criteria behind their determination. The study classifies investment profiles (conservative, moderate, aggressive) according to variables such as sector, company size, capital structure, and risk tolerance. Subsequently, these profiles are associated with specific theoretical models, establishing correlations between corporate behavior and financial methodology.

The results will support the development of a pedagogical tool that contextualizes project evaluation, helping students understand the diversity of approaches depending on the organizational setting. This approach enhances practical learning by linking theoretical knowledge with empirical evidence from the job market. The implementation of this guide is expected to improve the quality of learning in project evaluation, preparing professionals who are more aware of the complexity of decision-making in real business contexts.

**Keywords: Project evaluation – Discount rate – Investment profile – Engineering education – Situated teaching**

## 1. INTRODUCCIÓN

En la enseñanza universitaria de evaluación de proyectos, especialmente en carreras de ingeniería, suele predominar una formación técnica centrada en indicadores financieros clásicos, como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), bajo el supuesto de que los parámetros requeridos para su cálculo —entre ellos la tasa de corte— son conocidos, objetivos y técnicamente determinables. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones importantes cuando se transfiere a contextos reales, especialmente en economías emergentes donde las decisiones de inversión no siempre responden a criterios racionales estandarizados.

La tasa de corte, como aproximación del costo de oportunidad del capital, constituye un parámetro decisivo en la evaluación financiera. No obstante, investigaciones empíricas en empresas latinoamericanas revelan que su determinación responde con frecuencia a criterios subjetivos, informales o incluso arbitrarios, dependiendo del tipo de empresa, su tamaño, sector, acceso al crédito y perfil del decisor (Narváez, 2007). En este escenario, el uso rígido de modelos como el Modelo de valoración de activos de capital (CAPM su sigla en inglés), sin ajustes contextuales, puede generar valores de tasa que tornan inviable cualquier proyecto, desdibujando su sentido práctico como herramienta de evaluación.

Este trabajo parte del reconocimiento de esa brecha entre teoría y práctica para proponer una estrategia de enseñanza situada que ayude a los estudiantes a comprender cómo las empresas reales —y particularmente las pymes industriales— determinan la tasa de corte en función de su perfil de inversión. A partir de una encuesta a graduados de ingeniería industrial, se construyen perfiles de inversor típicos y se vinculan con rangos razonables de tasa, proponiendo una guía metodológica que los estudiantes podrán aplicar en sus propios proyectos.

Se busca, así, fortalecer la formación profesional promoviendo una evaluación contextualizada de proyectos, que no solo incorpore herramientas técnicas, sino también una lectura crítica de las condiciones económicas, organizacionales y decisionales que inciden en la inversión real.

### 1.1 Antecedentes y Justificación

La formación en evaluación de proyectos ha sido históricamente estructurada desde un enfoque normativo, basado en modelos de finanzas clásicas y teorías del valor presente neto que presuponen la existencia de mercados eficientes, tasas de interés libres de distorsiones y decisiones racionales orientadas a la maximización de beneficios. Estos supuestos, si bien útiles como marco teórico, resultan escasamente representativos de las condiciones que enfrentan empresas reales, especialmente en economías emergentes como la argentina.

Numerosos estudios han documentado que las pequeñas y medianas empresas (pymes) —principales actores del entramado productivo nacional— carecen de acceso fluido al mercado de capitales, operan con restricciones de financiamiento y adoptan criterios de inversión basados más en la experiencia, intuición y urgencias de continuidad que en cálculos formales de rentabilidad. En este sentido, el concepto de “tasa de corte” como parámetro técnico y universal pierde validez práctica: las tasas utilizadas varían ampliamente según el perfil del decisor, el sector productivo, el contexto macroeconómico y la percepción subjetiva del riesgo. (Gnecco, 2006; Pereiro, 2001; Sabal, 2002).

Desde el campo de la docencia, esto plantea un desafío, ¿cómo formar estudiantes capaces de aplicar herramientas de evaluación financiera si los supuestos de esos modelos no se cumplen en el mundo real? Esta tensión cobra especial relevancia en carreras como Ingeniería industrial o Ingeniería en alimentos, donde los proyectos de inversión se construyen a partir de contextos productivos concretos.

La presente investigación surge de esa preocupación docente. Desde el punto de vista pedagógico, se genera una desconexión entre los contenidos impartidos y las prácticas reales, tal como lo advierte la literatura sobre enseñanza situada (Brown, Collins & Duguid, 1989), el conocimiento se vuelve significativo cuando se construye en contextos que emulan la práctica. En este sentido, la formación

profesional requiere incorporar no solo saberes conceptuales, sino también herramientas adaptadas a entornos complejos, inciertos y heterogéneos.

A través del relevamiento empírico de prácticas reales de graduados insertos en el mercado laboral, se busca generar una herramienta metodológica que permita trasladar la heterogeneidad de criterios empresariales al aula. Lejos de proponer una única tasa “correcta”, el objetivo es ofrecer un marco de decisión contextualizado que facilite la elección razonada de tasas en función del tipo de empresa, su estrategia, y su entorno.

De este modo, el trabajo no solo aporta al diseño didáctico de la asignatura Evaluación de Proyectos, sino que también contribuye a una enseñanza situada, más alineada con la complejidad e incertidumbre de la realidad económica en la que los futuros profesionales deberán actuar.

### 1.2 Marco teórico

#### 1.2.1 La racionalidad contextual en la definición de la tasa de corte

Uno de los aspectos más controvertidos en la evaluación de proyectos, es la determinación de la tasa de corte. En mercados emergentes, donde el sistema financiero suele ser débil, la inflación suele ser elevada y el acceso al crédito puede estar restringido, el concepto mismo de "costo de capital" resulta problemático. Pereiro (2001) advierte que, en ausencia de alternativas de inversión líquidas y seguras, muchos empresarios reinvierten por necesidad y no por evaluación comparativa de rentabilidad. En este contexto, el “costo de oportunidad” pierde su sentido operativo.

Narváez (2021) y Padovan (2021) coinciden en señalar que, especialmente en pymes argentinas, la tasa de corte no suele surgir de modelos financieros formales, sino de criterios pragmáticos o conservadores, ligados al juicio del propietario. Gnecco (2012) introduce el concepto de “racionalidad de tasas” para dar cuenta de este fenómeno: cuando las tasas teóricas se alejan tanto de la realidad que impiden cualquier inversión viable, su aplicación deja de ser útil y se transforma en un obstáculo artificial. Dumrauf (2002) refuerza esta idea al advertir que la suma mecánica del riesgo país puede derivar en tasas de corte inoperables.

#### 1.2.2 Hacia una enseñanza contextualizada: integración de perfiles de inversión

Frente a este panorama, comienza a consolidarse una línea de trabajo que propone una enseñanza contextualizada o situada de la evaluación de proyectos. Este enfoque reconoce que la selección de la tasa de corte no es una decisión puramente técnica, sino estratégica y contextual. La definición de perfiles de inversión —conservador, moderado, agresivo— permite reflejar la diversidad de situaciones empresariales y aproximar al estudiante a decisiones reales.

En esta línea, el presente trabajo adopta una perspectiva empírica para construir una herramienta pedagógica que conecte los modelos teóricos con los perfiles reales de empresas relevadas. La encuesta a graduados busca identificar patrones en el uso de tasas de corte según características como tamaño, sector, estructura de capital, y tipo de decisión. Esta estrategia no solo promueve una mejor comprensión de la lógica empresarial, sino que también estimula en los estudiantes una actitud crítica frente a los modelos, dotándolos de herramientas para tomar decisiones más razonadas y adaptadas a distintos entornos.

## 2. DESARROLLO

### 2.1 Metodología

#### 2.1.1 Enfoque general

Este estudio se inscribe dentro de una perspectiva metodológica de tipo aplicada, con un enfoque cualitativo-cuantitativo mixto, orientado a la producción de una herramienta didáctica basada en evidencia empírica. El diseño corresponde a un estudio exploratorio-descriptivo, ya que busca relevar

y caracterizar el modo en que las empresas definen la tasa de corte para sus decisiones de inversión, a fin de generar tipologías que puedan ser trasladadas al aula.

### 2.1.2 Técnicas e instrumentos

Se construyó un instrumento de recolección de datos en formato de encuesta estructurada, destinada a graduados de la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de Luján, quienes se desempeñan laboralmente en distintas organizaciones. La encuesta fue diseñada en Google Forms y sometida a prueba piloto antes de su implementación definitiva (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2021).

El cuestionario incluyó variables de identificación (sector, tamaño de empresa, tipo de propiedad), aspectos financieros (moneda de evaluación, tasa utilizada, origen de la tasa), y percepciones sobre riesgo, decisiones de inversión y criterios de selección. Se incorporaron también preguntas cerradas con opción múltiple y algunas escalas de valoración.

La encuesta incluyó preguntas cerradas y abiertas para relevar: sector de desempeño profesional, tipo y tamaño de empresa, participación en procesos de evaluación de proyectos, tasa de corte utilizada y moneda de cálculo, conocimiento sobre el método de determinación de la tasa, acceso a financiamiento externo, perfil de inversor de la organización y del graduado/a, y observaciones cualitativas.

### 2.1.3 Muestra

La población objetivo estuvo conformada por graduados de ingeniería industrial con experiencia en tareas vinculadas a evaluación de proyectos o finanzas. Se recibieron 83 respuestas, luego de un proceso de depuración que excluyó formularios incompletos, y aquellos en los que el graduado/a declara no participar en la evaluación de proyectos o desconocer cómo se toman las decisiones de inversión se definió la muestra en 64 casos que cumplían los criterios de completitud, coherencia y pertinencia del rol. (INEGI, 2021)

### 2.1.4 Estrategia de análisis

Se utilizó una combinación de análisis estadístico descriptivo y cruces de variables que permiten identificar perfiles de inversión en función de tamaño y sector de la empresa, tipo de decisión (reposiciones, nuevas líneas, expansión), moneda para el cálculo de tasa, modo de determinación de la tasa y nivel estimado de riesgo del negocio.

Los datos fueron analizados con herramientas de hoja de cálculo y visualización (Excel), identificando patrones representativos.

### 2.1.5 Procesamiento y análisis

La base de datos fue sistematizada en una planilla de cálculo. Para el análisis, se propuso un enfoque de desdoblamiento de variables cualitativas para su cruce con otras de tipo categórico, orientado a identificar asociaciones entre tipo de organización, tamaño y prácticas de evaluación, analizar la relación entre el perfil de inversor y el método de determinación de la tasa, observar la coherencia entre moneda de cálculo, tasa aplicada y contexto empresarial y detectar patrones por sector o función de desempeño del graduado/a.

Esta estrategia busca construir tipologías preliminares de perfiles de inversión y vincularlas con modelos teóricos de tasa de corte, a fin de desarrollar una guía pedagógica situada para la enseñanza de evaluación de proyectos de inversión.

### 2.1.6 Validación pedagógica

A partir de los resultados, se elaboró una guía metodológica. Esta guía operativa propone una metodología para estimar la tasa de corte para proyectos de inversión productiva en Argentina, integrando un CAPM base en USD y ajustes por riesgo (operativo, tamaño/financiamiento, exposición

a riesgo país y perfil del inversor), con opción de conversión a moneda argentina para que los estudiantes puedan vincular las características de un proyecto de ingeniería con un perfil empresarial típico y seleccionar una tasa de corte adecuada. Esta guía será evaluada en talleres del equipo docente y sometida a retroalimentación de graduados, estudiantes y docentes, en una etapa posterior.

## 2.2 Resultados y discusión (análisis preliminar)

### 2.2.1 Análisis combinado de variables

En primer lugar, el procesamiento de datos permitió obtener una primera tipología de perfiles de inversión empresariales, a partir del análisis combinado de las siguientes variables:

- Tipo y tamaño de empresa: empresas privadas de capitales nacionales, empresas privadas de capitales extranjeros, cooperativas, emprendimientos propios. El tamaño se estableció según categorización vigente de la Agencia de recaudación y control aduanero (ARCA).
- Moneda en que se calcula la tasa de corte: se consideró solo moneda argentina y dólares estadounidenses.
- Método declarado de determinación de la tasa: Costo de capital promedio (WACC), Tasa interna definida por la dirección, Modelo de valoración de activos de capital (CAPM), Costo de oportunidad de alternativas financieras.
- Tipo de inversor percibido: conservador, moderado o agresivo/neutral.

### 2.2.2 Acceso a financiamiento y método de determinación

Las empresas con acceso a mercados o financiamiento externo tienden a usar WACC, mientras que aquellas sin acceso recurren a tasas internas o referencias alternativas. Este cruce sugiere que la estructura financiera habilita o restringe el uso de herramientas teóricas.

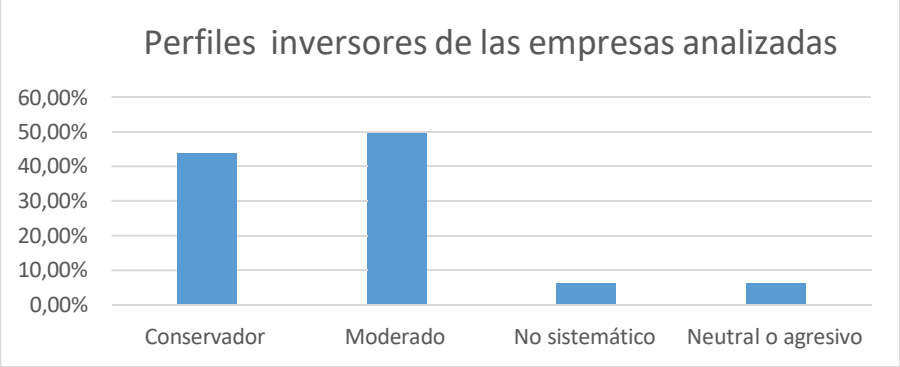
*Tabla 1 Relación entre modelo de tasa de corte y acceso al financiamiento.*

| ***Acceso a financiamiento*** | ***WACC*** | ***Tasa interna*** | ***Alternativas financieras*** | ***Otro*** |
|---|---|---|---|---|
| Con acceso | 37,5% | 18,75% | 12,5% | 0% |
| Sin acceso o limitado | 0% | 6,5% | 12,5% | 6,5% |

### 2.2.3 Perfil de riesgo de los inversores y tasa aplicada

El siguiente gráfico muestra la distribución porcentual de perfiles de inversores respecto al riesgo.

*Gráfico 1 – Perfiles de riesgo de los inversores*




Se observa que incluso entre quienes se definen como conservadores, las tasas aplicadas varían ampliamente, y no necesariamente son más altas. Esto puede indicar una disonancia entre percepción

de riesgo y decisión financiera, lo cual refuerza la necesidad de enseñar a argumentar la coherencia entre ambos.

Los inversores que se reconocen como “agresivos/neutrales” suelen aceptar proyectos con retornos más inciertos, priorizando velocidad de recuperación o continuidad operativa. En sentido contrario, los perfiles conservadores priorizan garantías y optan por tasas más altas para “cubrirse del riesgo”, aun a costa de descartar proyectos viables en otras condiciones.

### 2.2.4 Método de determinación vs. Tipo de empresa

*Tabla 2 - Relación entre modelo de tasa de corte y tipo de empresa.*

| Perfil inversor | WACC | Tasa interna | Alternativas | Otro |
|---|---|---|---|---|
| Inversor corporativo con acceso a capitales | 31,25% | 6,25% | 6,25% | 12,50% |
| Inversor pyme con recursos propios | 12,50% | 6,25% | 18,75% | 6,25% |
| Emprendedor/a o socio/a único/a | 0 | 12,50% | 0 | 0 |

Este análisis refuerza el principio de que el tipo de empresa condiciona fuertemente el modelo utilizado, tanto por razones técnicas como por limitaciones estructurales. Las empresas corporativas tienden a usar el WACC, mientras que las pymes y emprendimientos utilizan criterios más internos o empíricos.

Estos resultados apoyan la idea de que el tamaño empresarial y el grado de formalización financiera inciden en la posibilidad de aplicar modelos teóricos complejos: las grandes empresas muestran mayor tendencia al uso de metodologías formales para definir la tasa de corte, en especial aquellas que operan en dólares. En cambio, las micro y pequeñas empresas tienden a establecer tasas de manera intuitiva o basadas en expectativas personales, sin aplicación de modelos técnicos.

### 2.2.5 Moneda de la tasa de corte

En la muestra analizada (n=64), las tasas de corte declaradas se distribuyen de la siguiente manera según la moneda en la que están expresadas:

*Tabla 3 –Frecuencia de la moneda en la que está expresada la tasa de corte.*

| Moneda | Frecuencia |
|---|---|
| Dólares estadounidenses | 62,5% |
| Pesos (moneda argentina) | 31,25% |
| Otra moneda | 25% |

*Nota: algunos encuestados marcaron más de una opción o utilizan tasas flexibles según el contexto, por lo que el total no suma 100%.*

Este dato aporta un nuevo matiz: muestra que más del 60% de los encuestados declara expresar la tasa de corte en dólares estadounidenses, incluso en empresas nacionales o pymes, lo que puede reflejar:

- La búsqueda de una moneda más estable como referencia.
- La costumbre de evaluar inversiones en términos de valor dólar, aun cuando los flujos están en pesos.

- Una desconexión entre la tasa y la moneda en la que efectivamente se proyectan los ingresos y egresos del proyecto.

Las tasas expresadas en dólares son predominantes en empresas medianas y grandes exportadoras o de capital extranjero, y suelen oscilar entre el 11% y el 18%. Las tasas expresadas en pesos, en cambio, varían ampliamente (de 60% a más del 100%) y presentan escasa consistencia metodológica, reflejando más una percepción de “rentabilidad mínima esperada” ante contextos inflacionarios.

### 2.2.6 Desajuste entre teoría y práctica

El análisis reveló un desajuste entre los modelos de tasa enseñados en el ámbito académico y las prácticas empresariales reales. Más de la mitad de los encuestados señalaron que en sus organizaciones no se utiliza el CAPM ni se considera explícitamente el riesgo país, sino que se define una tasa “de referencia” interna, muchas veces heredada o definida por el dueño o directorio.

## 2.3 Implicancias didácticas

En función de los hallazgos, se construyó una guía metodológica preliminar para ayudar a los estudiantes de ingeniería a construir una tasa de corte adecuada al contexto de análisis y coherente con el perfil de inversor supuesto para sus proyectos. Se presenta a continuación una versión preliminar de esta herramienta que propone asociar cada tipo de inversor (conservador, moderado, agresivo o neutral) a un rango de tasas de corte razonables, diferenciando según moneda. Con la información relevada en las encuestas se construyeron tablas que asocian criterios a rangos de sobretasas a aplicar sobre un modelo CAPM base en dólares, ajustado por riesgos vinculados al tamaño de empresa, acceso al crédito, riesgo operativo del sector, riesgo país. Además, la guía incluye ejemplos específicos para proyectos manufactureros típicos de las carreras de Ingeniería en Alimentos e Ingeniería Industrial, brinda orientaciones para la conversión de tasas en dólares a pesos, con supuestos explícitos y teniendo en cuenta las limitaciones del uso mecánico de tasas irreales en contextos inflacionarios extremos. A continuación se presenta un esquema representativo de la guía metodológica.

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TASA DE CORTE EN PROYECTOS DE INGENIERÍA. ESQUEMA BÁSICO

## Paso 1 · Determinar variables de entrada

Tnmr (T-Bond 10Y EE. UU.),

Tme (S&P 500 10A), β (sector/empresa), EMBI+ ARG, λ (sensibilidad a RP),

Δop (riesgo operativo),

Δt/f (tamaño & crédito),

Δpi (perfil inversor), πArg/πUSA,

Moneda del proyecto.
Nota: fuentes sugeridas Damodarán, ARCA MiPyME,

Tablas de la asignatura, series de inflación y EMBI+.

## Paso 2 · CAPM base (USD)

TCb = Tnmr + β × (Tme − Tnmr).

CAPM captura el riesgo sistemático del mercado en USD.

## Paso 3 · Definir la moneda del proyecto

¿Mercado local argentino?

Sí → tasa final en ARS (seguir Pasos 4–6).

No → tasa final en USD (seguir Pasos 4–5).

## Paso 4 · Ajustes por riesgo (sobre USD)

Δop (operativo), Δt/f (tamaño & crédito),

RP = λ × EMBI+/100, Δpi (perfil inversor).

Rangos orientativos (p.p.): Δt/f 0–3.5;

Δop 0–3.0; Δpi −1/0/+1; RP según λ·EMBI.

## Paso 5 · Tasa ajustada en USD

**TC= TCb + Δop + Δt/f + RP + Δpi.**

Si la moneda final es USD, aquí finaliza:

Tasa de Corte = TC.

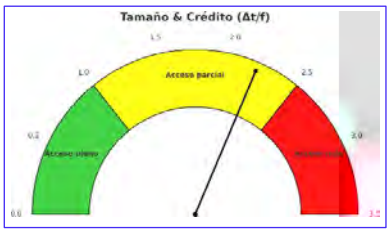
## Paso 6 · Conversión a ARS (si corresponde)

Ajuste inflacionario (Alternativa Fisher):

(1 + TC_ARS) = (1 + Tc) × (1 + πArg) /(1 + πUSA).

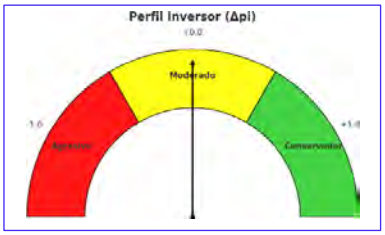
## Referencias para ajustes por riesgo










## EJEMPLO: Situación de tu proyecto (evaluado en 2025)

PyME argentina que vende en el mercado local ⇒RP 1400 pb, λ:0,4
MP y maquinarias mayormente nacionales ⇒moneda AR$

Producto maduro / conocido ⇒ Δop ↓
Inversores que asumen riesgos moderados ⇒ Δpi ↔

PyME sin acceso al crédito (fondos propios) ⇒ Δt/f ↑

**CAPM base (USD)**

Valores didácticos: Tnmr = 4%, Tme = 9%, β = 0,9
TCb = 4 + 0,9 × (9 − 4) = 8,5%

**Ajustes por riesgos**

TCusd = TCb + Δt/f + Δop + RP + Δpi
TCusd = 8,5 + 1,5 + 0,8 + 5,6 + 0 = 16,4%

**Si evaluás en ARS (Fisher)**

πArg = 30%, πUSA = 3%
(1 + TC_ARS) = (1 + 0,164) × (1 + 0,30) / (1 + 0,03)
⇒ TCARS ≈ 47%

## 3. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares de esta investigación permiten visualizar patrones consistentes con lo anticipado en el marco teórico y, a la vez, abren nuevas líneas de reflexión sobre la enseñanza de evaluación de proyectos en contextos reales. Refuerzan la necesidad de una enseñanza de la evaluación de proyectos más situada y conectada con la realidad profesional de los graduados.

En primer lugar, se constata la existencia de perfiles diferenciados de comportamiento inversor según el tamaño de la empresa, su acceso al financiamiento, su mercado objetivo y el tipo de organización. Esta segmentación es coherente con lo reportado por Pereiro y Galli (2001), Mongrut (2007) y Narvaéz (2021), quienes documentan una heterogeneidad significativa en las prácticas empresariales para la definición de la tasa de corte. En particular, el presente estudio refuerza la idea de que muchas pequeñas y medianas empresas, determinan sus tasas de forma heurística, guiadas por la experiencia o los requerimientos subjetivos del empresario o proyectista.

En segundo lugar, se evidencia una distancia notoria entre las tasas aplicadas en contextos empresariales reales y los valores que surgirían de una aplicación estricta de modelos teóricos como el CAPM. Esto confirma la advertencia de autores como Gnecco (2006, 2012), Dumrauf (2002) y Sabal (2002), quienes señalan que la aplicación mecánica de modelos desarrollados para mercados estables puede conducir a resultados disfuncionales en economías emergentes. La noción de una “racionalidad de tasas”, que prioriza la viabilidad operativa sobre la pureza teórica, se muestra pertinente para comprender estas decisiones.

Desde una perspectiva pedagógica, estos hallazgos subrayan la necesidad de promover una enseñanza situada, que conecte los contenidos teóricos con las condiciones reales del entorno productivo y financiero en el que actuarán los futuros ingenieros. La construcción de una guía metodológica para la definición de la tasa de corte, como resultado de esta investigación, se orienta en esa dirección. Su propósito es dotar a los estudiantes de herramientas prácticas que les permitan identificar perfiles inversores y estimar tasas coherentes con esos escenarios, sin resignar el rigor analítico ni adoptar soluciones arbitrarias.

Además, la posibilidad de utilizar esta guía en proyectos finales con consignas realistas (por ejemplo, plantas manufactureras para Ingeniería en Alimentos e Ingeniería Industrial) facilita el desarrollo de competencias integradas: análisis de contexto, toma de decisiones financieras y argumentación técnica. Esta articulación entre teoría, evidencia y aplicación contribuye a cerrar la brecha entre la universidad y el mundo del trabajo.

No obstante, deben reconocerse ciertas limitaciones del estudio, por ejemplo, la muestra inicial (n=64) corresponde a un recorte aún parcial de la encuesta, y la categorización de perfiles inversores parte de simplificaciones analíticas que podrían enriquecerse con mayor profundidad cualitativa o con estudios sectoriales específicos.

Finalmente, el análisis plantea desafíos para la formación en evaluación de proyectos. Por un lado, demanda incorporar criterios de flexibilidad y adecuación contextual en el uso de modelos financieros. Por otro, invita a reflexionar sobre el rol formativo de la incertidumbre: no se trata de simular certezas, sino de enseñar a pensar críticamente en escenarios inestables y complejos. La educación ingenieril, en este sentido, puede fortalecerse como espacio de formación integral para la toma de decisiones responsables.

## 4. REFERENCIAS

Brown, J. S., Collins, A., & Duguid, P. (1989). Situated cognition and the culture of learning. *Educational Researcher, 18*(1), 32–42. https://doi.org/10.3102/0013189X018001032

Dumrauf, G. A. (2002). *Riesgo país y tasa de descuento: una revisión crítica* [Documento de trabajo]. https://www.dumrauf.com.ar/spanish/arts/articulo02.pdf

Gnecco, G. (2006, 2012). *Racionalidad de tasas y evaluación de proyectos en contextos inestables* Revista FACES, 14(30–31), 25–45. https://ideas.repec.org/a/nmp/rfaces/v14y2008i30-31p25-45.html

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Guía de diseño conceptual para encuestas: Fase de diseño de la Norma Técnica del Proceso de Producción de Información Estadística y Geográfica*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/infraestructura/aseguramiento/doc/guia_de_diseno_conceptual.pdf

Mongrut, S. (s. f.). *La tasa de descuento en América Latina* (Working Paper 06-09). Centro de Investigación, Universidad del Pacífico. http://hdl.handle.net/11354/306

Narváez, J. L. (2007*). Fijación de la tasa de corte en la evaluación de proyectos de inversión: Un análisis desde el desarrollo empresario*. Técnica Administrativa (CyTA), 6(2), Artículo 3. https://www.cyta.com.ar/ta/article.php?id=060203

Padovan, M. (2021). *Evaluación de proyectos en pandemia: estudio de casos en PyMEs argentinas*. En VI Congreso de Ciencias Económicas del Centro de la República (Actas). Universidad Nacional de Villa María. https://biblio.unvm.edu.ar/opac_css/39484/3143/PADOVAN-Evaluacion-proyectos-inversion-pandemia.pdf

Pereiro, L. E. (2001). *The valuation of closely-held companies in Latin America*. *Emerging Markets Review.* 2(4), 330–370. https://ideas.repec.org/a/eee/ememar/v2y2001i4p330-370.html

Pereiro, L. E., & Galli, M. (2000). *La determinación del costo del capital en la valuación de empresas de capital cerrado: Una guía práctica*. Universidad Torcuato Di Tella & Instituto Argentino de Ejecutivos de Finanzas. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1874158

Sabal, J. (2002). *Financial decisions in emerging markets*. Oxford University Press.

**Agradecimientos**

*Agradecemos a la **universidad pública** por el acceso a una formación de calidad, gratuita e inclusiva, y por brindar los espacios académicos que hicieron posible este trabajo. Reconocemos especialmente el compromiso de nuestros graduados/as que participaron de la encuesta, cuya colaboración desinteresada fortaleció la dimensión empírica y el sentido social de esta investigación.*

# COMPRENDER PARA INTERVENIR: ANÁLISIS DE LA REINSCRIPCIÓN RECURRENTE EN LA ASIGNATURA ANÁLISIS NUMÉRICO Y CÁLCULO AVANZADO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Rodríguez, Georgina Beatriz; Cabo, Natalia Carolina; Salguero, María Guadalupe

*Facultad Regional San Nicolás – Universidad Tecnológica Nacional.*
*grodriguez@frsn.utn.edu.ar; ncabo@frsn.utn.edu.ar; msalguero@frsn.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

Este trabajo se enfoca en el análisis de un fenómeno persistente en la trayectoria académica de algunos estudiantes de Ingeniería Industrial de la Facultad Regional San Nicolás: la reiterada inscripción a cursado en algunas asignaturas de la carrera, en particular en Análisis Numérico y Cálculo Avanzado, sin lograr la regularidad ni la aprobación correspondientes.

Se sospecha que esta situación de estancamiento no responde únicamente a dificultades cognitivas o carencias en la formación previa, sino que se entrelaza con otros factores. Entre ellos, se destacan dificultades inherentes al contenido abstracto y la complejidad técnica de la asignatura, aspectos estructurales de los planes de estudio y factores psicoemocionales como la ansiedad académica, la desorganización y la pérdida de motivación.

Desde el Grupo Ingeniería & Educación, en conjunto con la Secretaría Académica, se aborda el problema a partir de un enfoque metodológico mixto, con el objetivo de identificar las causas subyacentes que llevan a que un número significativo de estudiantes se inscriba reiteradamente en esta materia sin lograr avances sustantivos y diseñar estrategias de intervención que permitan mejorar el rendimiento y la permanencia estudiantil.

En este trabajo se exponen los resultados del análisis realizado y se proponen posibles líneas de acción para revertir esta problemática y favorecer las trayectorias académicas.

**Palabras Claves:** Análisis Numérico y Cálculo Avanzado, cursado reiterado, seguimiento, propuestas

**ABSTRACT**

This paper focuses on the analysis of a persistent phenomenon in the academic trajectory of some Industrial Engineering students at the San Nicolás Regional Faculty: repeated enrollment in certain subjects, particularly Numerical Analysis and Advanced Calculus, without achieving regular status or passing the course.

It is suspected that this stagnation is not solely due to cognitive difficulties or gaps in prior knowledge, but rather intertwined with other factors. These include the abstract nature and technical complexity of the subject matter, structural aspects of the curriculum, and psycho-emotional factors such as academic anxiety, disorganization, and loss of motivation.

The Engineering & Education Group, in collaboration with the Academic Secretariat, addresses this issue through a mixed-methods approach, aiming to identify the underlying causes behind repeated enrollment without substantial progress, and to design intervention strategies to improve student performance and retention.

This study presents the results of the analysis and proposes possible courses of action to reverse this trend and support academic progression.

**Keywords:** Numerical Analysis and Advanced Calculus, repeated enrollment, academic tracking, improvement strategies

## 1. INTRODUCCIÓN

En el recorrido por la carrera de Ingeniería Industrial, cada estudiante transita una experiencia única, marcada por desafíos personales, académicos e institucionales. Algunas materias se convierten en verdaderos puntos de inflexión: no necesariamente por su complejidad técnica, sino por cómo se articulan con el perfil del estudiante, el contexto pedagógico y las exigencias del plan de estudios.

Hace ya un tiempo que el análisis del rendimiento académico en las carreras de ingeniería ha sido objeto de múltiples estudios, especialmente en relación con las asignaturas específicas de la carrera. Sin embargo, existe una menor atención hacia las materias que no lo son, a pesar de que también pueden representar obstáculos significativos en la trayectoria de los estudiantes. En este contexto, el presente trabajo se centra en el fenómeno del recursado, en algunos casos persistente, en la asignatura Análisis Numérico y Cálculo Avanzado (ANyCA) en la Facultad Regional San Nicolás, de la carrera Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN). A pesar de ser una materia no específica, pareciera tener un impacto significativo en la trayectoria de algunos estudiantes.

Desde su incorporación al plan de estudios de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica Nacional en el año 2006, la materia ha atravesado tres reformas curriculares. La última de ellas comenzó a implementarse gradualmente en la Facultad Regional San Nicolás a partir de 2023, y se basa en un enfoque por competencias, conforme a los lineamientos establecidos en la Resolución Ministerial 1543/2021. Dichos lineamientos tienen como referencia las bases propuestas en el Libro Rojo del CONFEDI (2018). En particular, la asignatura presenta una reducción de contenidos, y algunas modificaciones en las prácticas en el aula y en la evaluación.

A lo largo de casi dos décadas, se observa que aproximadamente un tercio de los estudiantes que han pasado por el aula de tercer año de la carrera ha tenido que cursarla más de una vez. Este dato, lejos de ser anecdótico, invita a preguntarse qué factores están detrás de esta persistencia: ¿es una cuestión de diseño curricular, de estrategias de enseñanza, de perfil del estudiante, o de algo más profundo que atraviesa la experiencia universitaria?

Tal como señalan Carrizo et al. (2022), “el recursado reiterado de materias básicas en carreras de ingeniería suele estar vinculado a factores socioeducativos, metodológicos y de diseño curricular, que no sólo afectan el rendimiento académico, sino que también pueden derivar en el abandono de la carrera”. Aunque el estudio se centra en materias del primer año, sus conclusiones permiten extender la reflexión hacia otras asignaturas que, sin ser troncales, presentan patrones similares, como es el caso de la asignatura en estudio.

Este estudio propone mirar más allá de los números y explorar las causas y consecuencias del recursado reiterado en una materia que, aunque no central en el plan de estudios, afecta tanto la permanencia como el avance académico. A través del análisis de datos históricos, encuestas y revisión documental, se busca comprender este fenómeno y aportar reflexiones que puedan enriquecer el debate sobre la mejora continua en la formación de ingenieros.

## 2. MARCO TEÓRICO

El rendimiento académico en carreras de ingeniería ha sido ampliamente estudiado, especialmente en relación con las materias básicas del primer año. Estas asignaturas suelen presentar altos índices de recursado, lo que ha sido vinculado a múltiples factores de tipo pedagógico, socioeconómico y estructural. Aunque la mayoría de los estudios se centran en materias troncales, el fenómeno del recursado también se manifiesta en asignaturas no centrales, como es el caso de *Análisis Numérico* en la UTN Facultad Regional San Nicolás.

Carrizo et al. (2022) señalan que “el rendimiento académico suele estar afectado por múltiples factores de tipo socioeducativos, socioeconómicos, demográficos y actitudinales, que sin duda condicionan el desempeño del estudiante frente al cursado de las materias”. En su estudio exploratorio sobre estudiantes que recursan materias básicas en UTN San Francisco, identifican que la inscripción a cursado reiterada puede derivar en frustración, retraso en la carrera e incluso abandono, lo que convierte al seguimiento académico en una herramienta clave para la gestión institucional.

Por otro lado, Gutiérrez-Monsalve et al. (2023) destacan que “el rendimiento académico es una estrategia pedagógica adecuada para determinar la adquisición de resultados de aprendizaje, y su monitoreo es esencial para la toma de decisiones respecto a planes de acompañamiento y mejora de la calidad educativa”. En su investigación, identifican factores de riesgo en estudiantes de ingeniería,

encontrando que variables sociodemográficas e institucionales tienen un peso significativo en el desempeño académico.

Además, desde una perspectiva pedagógica, Fava et al. (2023) analizan cómo el recursado puede ser experimentado de formas diversas por los estudiantes, y advierten que “la experiencia de recursar puede ser vivida como una oportunidad de aprendizaje, pero también como una marca de fracaso que afecta la autoestima y la percepción de la propia capacidad académica”. Esta mirada permite comprender el recursado no sólo como un indicador académico, sino como una experiencia subjetiva que puede influir en la trayectoria universitaria, especialmente en contextos de transformación institucional como el post-pandemia.

En conjunto, estos aportes permiten construir un marco conceptual que reconoce el recursado persistente como un fenómeno complejo, influido por múltiples dimensiones. Desde los factores estructurales y socioeducativos hasta las vivencias subjetivas del estudiante, el recursado en materias no específicas como Análisis Numérico y Cálculo Avanzado exige abordajes integrales que articulen la gestión académica, la docencia y el acompañamiento institucional.

## 3. OBJETIVOS

**General:**

- Analizar el fenómeno del recursado reiterado en la asignatura Análisis Numérico y Cálculo Avanzado de la carrera Ingeniería Industrial en la UTN Facultad Regional San Nicolás, mediante un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo), con el fin de identificar los factores que lo explican y proponer estrategias institucionales orientadas a su disminución.

**Específicos:**

- Medir la frecuencia, persistencia y evolución del recursado en las asignaturas a lo largo del tiempo.
- Identificar la distribución de estados académicos (recursado, regularidad, aprobación) y su impacto en la trayectoria académica de los estudiantes.
- Relevar las percepciones de los estudiantes sobre las principales dificultades que enfrentan, los apoyos institucionales disponibles y las posibles acciones de mejora.
- Sistematizar los hallazgos para elaborar propuestas de intervención orientadas a mejorar la permanencia y el rendimiento académico en dichas materias.

## 4. METODOLOGÍA.

Para llevar a cabo un análisis integral del fenómeno del recursado reiterado en Análisis Numérico y Cálculo Avanzado, se adoptó un diseño metodológico mixto, que articula enfoques cuantitativos y cualitativos en función de la naturaleza compleja del problema abordado.

### 4.1 Datos cuantitativos

Se analizaron datos provistos por el sistema académico de la Universidad, abarcando un período representativo del comportamiento académico en la asignatura. La base de datos incluyó información sobre:

- Inscripciones por estudiante a lo largo del tiempo.
- Estados académicos alcanzados (regular, libre, aprobado, abandono).
- Número de recursado por asignatura.

A partir de estos registros, se construyeron indicadores clave tales como frecuencias, proporciones y promedios de recursado, así como la distribución de estados académicos finales. Este análisis permitió dimensionar la magnitud del fenómeno y caracterizar patrones generales de desempeño académico en las materias objeto de estudio.

### 4.2 Datos cualitativos

Para complementar la evidencia cuantitativa, se diseñó y aplicó una encuesta autoadministrada dirigida a estudiantes que cursaron la asignatura más de tres veces. El cuestionario incluyó preguntas cerradas y abiertas que permitieron indagar sobre:

- Cantidad de veces que se inició la cursada.
- Motivos de abandono o desaprobación.
- Percepción sobre el nivel de dificultad de la asignatura.
- Frecuencia de asistencia y participación en clases.
- Evaluación de las prácticas y del acompañamiento docente.
- Propuestas personales para mejorar el cursado.

Las respuestas abiertas fueron analizadas mediante técnicas de text-mining, lo cual facilitó la categorización temática de las percepciones estudiantiles y la identificación de patrones discursivos recurrentes.

### 4.3 Triangulación y análisis

La articulación de ambos enfoques permitió una **triangulación metodológica**, en la que se combinaron los indicadores de objetivos de desempeño académico con las percepciones subjetivas de los estudiantes. Esta estrategia metodológica favoreció una comprensión más profunda del fenómeno, incorporando tanto los aspectos estructurales como las vivencias personales.

### 4.4 Consideraciones éticas

La participación fue voluntaria. Se garantizó la confidencialidad de las respuestas en todo momento, informando a los participantes sobre los objetivos del estudio y asegurando el uso responsable de la información recogida, en concordancia con los principios éticos de la investigación educativa.

## 5. RESULTADOS.

El análisis de los datos alojados en el sistema académico y de la encuesta realizada a los estudiantes que habían recursado en varias oportunidades, permitió identificar patrones consistentes que ayudan a comprender la persistencia del recursado en la asignatura Análisis Numérico y Cálculo Avanzado. A continuación, se detallan los principales hallazgos organizados en dos dimensiones: datos académicos y percepciones estudiantiles.

### 5.1 Análisis de datos académicos

La base de datos institucional permitió observar la magnitud y características del recursado. Desde el año 2006 hasta el 2025 inclusive, un total de 556 estudiantes se inscribió a cursado al menos una vez en la asignatura en estudio.

Del total de estudiantes inscriptos a cursado durante este período, el 66% cursó una única vez la asignatura, mientras que el 34% restante lo hizo al menos dos veces, como se observa en la Figura 1.

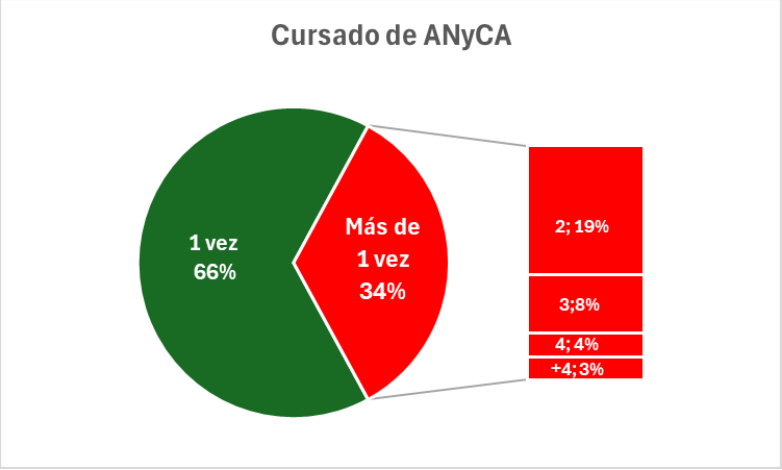



**Figura 1**. *Frecuencia de recursado en ANyCA*

El 34 % de los estudiantes se encuentra registrado como recursante en al menos una oportunidad. Esto implica que aproximadamente uno de cada tres no logra obtener la condición de regular o alcanzar la aprobación directa en la primera cursada de la asignatura. La Figura 1 evidencia que, aunque la mayoría logra avanzar sin repetir el cursado, el volumen del grupo que recursa es significativo en términos de permanencia y eficiencia académica. De aquellos estudiantes que se inscribieron a cursado más de una vez, el 19% lo hizo en dos oportunidades, el 8% lo hizo en tres, el 4% lo hizo en cuatro, y el 3% reiteró la inscripción a cursado más de cuatro veces.

Si bien el promedio de recursado entre 3 y 9 años es casi 4, es importante destacar que hay estudiantes que han intentado hacer la materia 7, 8 y hasta 9 veces, y no todos lo han conseguido en esa cantidad de intentos. Éstos no son solo números, se debe tener en cuenta que detrás de esto, hay una persona que trabaja, tal vez además padre o madre de familia, y el tema de la carrera se le hace cada vez más cuesta arriba.

De los estudiantes que llevan cursada la materia tres o más veces, 12 iniciaron el cursado en el año 2025. De este grupo, nueve abandonaron el cursado antes del receso invernal. Sólo tres quedan en carrera para la regularización o aprobación directa.

En la tabla 1 se muestran los resultados de cursada entre los años 2007 y 2024, clasificados en general como Aprobada o No aprobada. En el primer caso, se incluyen regulares, y promoción de TP hasta el año 2016, y regulares y aprobación directa desde el año 2017, que es cuando se comienza a aplicar el nuevo reglamento de estudio que incluye la aprobación directa en los posibles estados al finalizar la cursada.

*Tabla 1 Resultados de la cursada, desde 2007 a 2024*

| Año | No aprobada | Aprobada |
|---|---|---|
| 2.007 | 42% | 58% |
| 2.008 | 40% | 60% |
| 2.009 | 46% | 54% |
| 2.010 | 38% | 63% |
| 2.011 | 48% | 52% |
| 2.012 | 40% | 60% |
| 2.013 | 39% | 61% |
| 2.014 | 36% | 64% |
| 2.015 | 40% | 60% |
| 2.016 | 43% | 57% |
| 2.017 | 43% | 57% |
| 2.018 | 33% | 67% |
| 2.019 | 40% | 60% |
| 2.020 | 33% | 67% |
| 2.021 | 67% | 33% |
| 2.022 | 51% | 49% |
| 2.023 | 56% | 44% |
| 2.024 | 26% | 74% |

Con respecto al estado académico alcanzado en esta asignatura, se puede decir que, a partir de la implementación de la aprobación directa establecida en el nuevo reglamento de estudio en el año 2017, la cantidad de estudiantes que logra aprobar la asignatura fue aumentando, colaborando en este sentido a reducir la cantidad de años para obtener el título. Cabe aclarar también que desde ese año se propone a quienes alcanzan la condición de regular, una opción de presentarse a examen final antes de finalizar el ciclo académico en que obtuvieron esa condición, donde se los evalúa dando prioridad a los temas que no alcanzaron a aprobar durante la cursada. Esto hace que muchos estudiantes aprovechen esta instancia, siendo muy pocos los que, al finalizar el año académico, no logran aprobar la asignatura. En la Figura 2 se puede observar las proporciones de estudiantes con cursada aprobada

(verde) y cursada no aprobada (naranja). En el caso de cursada aprobada, el color oscuro indica aprobación directa, el claro condición regular. En el caso de cursada no aprobada, se puede ver que a partir del año 2022 aparece un color naranja claro, estos son los estudiantes que están indicados en el sistema académico con situación “abandonó”. Se empezaron a diferenciar a partir de ese año los estudiantes que finalizan, pero no aprueban la cursada (libres), de aquellos que directamente la abandonan.

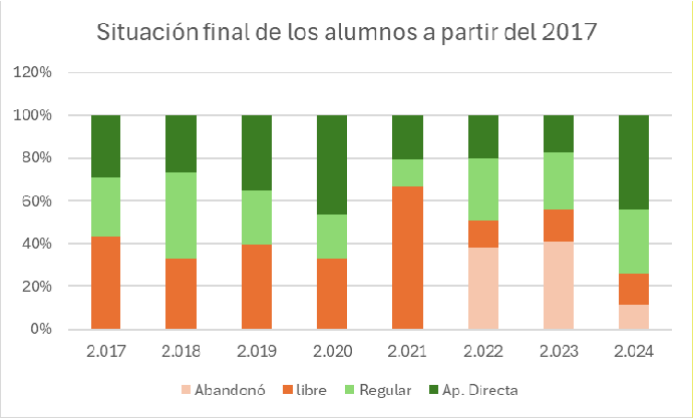



Figura 2. *Situación final a partir de la instauración de la Aprobación Directa*

Puede apreciarse también en el gráfico presentado en la Figura 2 que los resultados empeoraron entre los años 2021 a 2023, mejorando sustancialmente en el año 2024. Una causa posible podría ser el efecto pandemia.

### 5.2 Encuesta a estudiantes

Los resultados de la encuesta autoadministrada permiten complementar los datos institucionales con las percepciones y vivencias de los propios estudiantes. Esta encuesta fue dirigida a estudiantes que habían recursado la materia.

La mayoría de los encuestados declaró haberse inscripto tres o más veces en la asignatura, lo que confirma la persistencia del recursado reiterado. La Figura 3 ilustra esta distribución. Esta respuesta es coherente con los destinatarios de la encuesta.

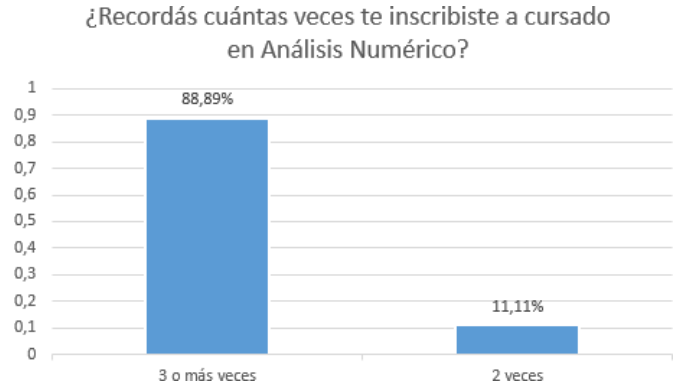



Figura 3. *Inscripción a cursado*

Se les consultó también si en sus cursadas, asistían regularmente a clase, y si realizaban las prácticas propuestas. Tal como muestra la Figura 5, las frecuencias de asistencia varían, aunque una proporción significativa indica no haber asistido regularmente. La Figura 6 indica que la proporción de estudiantes que realizaba las prácticas propuestas apenas supera el 50%. Ambos resultados pueden estar vinculados con el abandono o bajo rendimiento.







**Figura 5**. *Distribución de Asistencia a Clase*

***Figura 6***. *Distribución de prácticas propuestas*

En la pregunta sobre qué les sucedió en esas cursadas, la mayoría de los encuestados respondió que alcanzaron la regularidad en alguna instancia, pero se presentaron a examen y no lo aprobaron. Varios también expresaron haber tenido problemas personales.

Al preguntar sobre lo que podían considerar como causas del recursado, se destacan las razones:

- Abandono sin rendir y desaprobación de parciales.
- Problemas personales o laborales que afectaron la continuidad.
- Falta de comprensión de los contenidos y dificultades con la base matemática previa.
- Velocidad del dictado, alto nivel de abstracción y falta de articulación con materias correlativas.

Independientemente de las dificultades encontradas, el acompañamiento docente fue valorado como bueno a excelente. Sin embargo, algunos estudiantes señalaron la necesidad de:

- Mayor claridad en los criterios de evaluación.
- Más material práctico accesible, especialmente cartillas de ejercicios con resultados.

Algunas de las propuestas de mejora sugeridas por los estudiantes fueron:

- Incorporar clases de repaso con mayor frecuencia.
- Ajustar el ritmo de cursado, especialmente al inicio.
- Brindar mayor acompañamiento en las primeras semanas.
- Fortalecer la conexión con los contenidos previos y facilitar el acceso a material didáctico autogestionado.

Estos hallazgos muestran puntos en común entre los datos obtenidos y la percepción estudiantil, en cuanto al recursado persistente en algunos estudiantes.

### 5.3 Análisis en otras asignaturas

Se analizó también, para los casos de estudiantes con recursado persistente (tres años o más) en ANyCA su situación general en el resto de las materias.

Se encontró que, en su mayoría, estos estudiantes, también tienen dificultades en otras materias, ya sea que no alcanzaron a regularizarlas o las tienen regular pero no rindieron examen final, impidiendo el cursado de materias correlativas de años superiores.

Estas materias, según se observó, serían Análisis Matemático II, Física II, Informática II en su mayoría, también Química General y Sistemas de Representación en menor proporción; todas materias anteriores a ANyCA. En particular, se requiere aprobada Análisis Matemático II aprobada para poder rendir ANyCA.

## 6. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que el recursado reiterado en la asignatura Análisis Numérico y Cálculo Avanzado constituye un fenómeno complejo, que no puede ser atribuido exclusivamente a la dificultad técnica de los contenidos. La combinación de factores estructurales del plan de estudios, aspectos pedagógicos como el ritmo de cursado y la modalidad de evaluación, conocimientos previos y elementos personales como la organización del tiempo, la motivación y las condiciones laborales, configuran un entramado que incide directamente en la trayectoria académica de los estudiantes.

En este escenario, la reciente implementación del nuevo plan de estudios (2023) basado en competencias representa una oportunidad concreta para introducir mejoras institucionales relevantes. La incorporación de evaluaciones formativas, rúbricas claras, materiales mínimos viables y prácticas contextualizadas podría favorecer el aprendizaje progresivo, al tiempo que mejoraría la experiencia pedagógica en un contexto de transformación educativa.

El recursado reiterado en la asignatura Análisis Numérico y Cálculo Avanzado no puede comprenderse desde una única causa, sino como el resultado de una combinación de factores estructurales, pedagógicos y personales. Afrontar esta problemática requiere un abordaje integral, que articule acciones coordinadas entre la gestión académica, los equipos docentes y los programas de apoyo estudiantil, con una perspectiva orientada a fortalecer la permanencia con sentido y la equidad en las trayectorias universitarias.

Algunas limitaciones encontradas para la realización del estudio fueron:

- La dependencia de registros académicos históricos, cuya completitud y calidad puede ser heterogénea.
- La necesidad de validación más robusta de los instrumentos cualitativos utilizados.
- La focalización exclusiva en una asignatura, lo que sugiere la conveniencia de ampliar el estudio a otras materias con comportamientos similares.

## 7. PROPUESTAS

Desde el año 2016 se está trabajando en la incorporación de videos con desarrollos de temas teóricos y prácticos en el aula virtual, que el estudiante puede ver todas las veces que lo desee. La pandemia fortaleció la producción de este tipo de material, ya que se multiplicó la generación de videos, particularmente la resolución de problemas y ejercicios. Este material siempre está disponible en el campus.

A partir de la implementación del nuevo plan en el ciclo lectivo 2025, se han comenzado a incorporar herramientas de evaluación formativa en el campus, que los estudiantes recibieron con entusiasmo. Se sigue trabajando en la elaboración de más herramientas de este estilo.

Además de los cambios que ya están en marcha, teniendo en cuenta el análisis realizado, se proponen líneas de acción concretas que puedan ser implementadas de manera escalonada y articulada:

- Realizar un diagnóstico temprano del riesgo académico (semanas 1–2), con instrumentos breves que permitan identificar estudiantes en situación de vulnerabilidad desde el inicio del cursado. Identificar en particular aquellos estudiantes que reiteran su inscripción
- Acompañamiento de tutorías académicas desde la cátedra, espacios breves y focalizados para trabajar contenidos clave con apoyo docente o entre pares, junto con la entrega de material mínimo viable por unidad.
- Evaluación formativa y retroalimentación continua, aplicación de instancias evaluativas intermedias con retroalimentación inmediata y posibilidad de recuperación, para evitar acumulación de dificultades.
- Ajustes didáctico-curriculares puntuales, incorporación de actividades de visualización numérica, uso de software y ejemplos contextualizados para reducir la abstracción excesiva. Implementación de rúbricas claras para prácticas y evaluaciones.
- Lograr un acompañamiento psicoeducativo, a través de talleres o tutorías sobre técnicas de estudio, organización del tiempo y manejo de la ansiedad, en coordinación con el Departamento de la carrera.
- A su vez, realizar un seguimiento longitudinal con tableros de datos, Construcción de indicadores de avance por cohortes (frecuencia de recursado, tiempos de regularidad y aprobación), para monitorear resultados y ajustar intervenciones.

## 8. CONCLUSIONES

El presente estudio confirma que el recursado en Análisis Numérico y Cálculo Avanzado representa un inconveniente para un grupo no menor de estudiantes de la carrera de Ingeniería Industrial en la UTN FRSN. Los hallazgos muestran no sólo una alta frecuencia de reinscripciones, sino también la existencia de trayectorias marcadas por múltiples recursados consecutivos, con un promedio de cuatro reinscripciones por estudiante que recursa. Se observó que el inconveniente no es sólo en esta asignatura, sino en materias del ciclo básico de la carrera, como lo son Análisis Matemático II, Física II e Informática II, influyendo esto en el cursado de materias del ciclo superior, por el tema de las correlatividades del plan de estudio.

Estos datos reafirman la necesidad de abordar el recursado desde un enfoque integral e interdisciplinario, que articule la revisión curricular, la innovación en las prácticas de enseñanza y evaluación, y el acompañamiento psicoeducativo. Reducir el recursado reiterado no sólo impactaría positivamente en los indicadores institucionales de rendimiento y permanencia, sino que también mejoraría la experiencia formativa y emocional de los futuros ingenieros.

Es fundamental avanzar hacia propuestas integrales que incluyan el fortalecimiento de las articulaciones curriculares, el acompañamiento personalizado en los primeros tramos del cursado y la generación de recursos didácticos accesibles. Estas acciones, sostenidas en el tiempo, pueden contribuir a mejorar la permanencia, reducir el abandono y favorecer trayectorias académicas más fluidas y equitativas.

Finalmente, este trabajo sienta las bases para el diseño e implementación de estrategias piloto de intervención, así como para la construcción de un sistema de seguimiento longitudinal, que permita evaluar la efectividad de las medidas propuestas en el marco del nuevo plan por competencias.

Sería interesante realizar una comparación interregional, que permita identificar patrones comunes y divergentes entre distintas Facultades Regionales de la UTN.

## 9. REFERENCIAS.


Carrizo, C., Navarro Peláez, R., Viotti, D., & Barrera, F. (2022). *Un estudio exploratorio sobre alumnos recursantes de materias básicas de UTN San Francisco*. Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN. https://ria.utn.edu.ar/bitstreams/ef2c3ccd-079e-41cb-8b5f-bdc0adbfdeca/download

Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI). (2018). Libro Rojo: *Estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la República Argentina*. Universidad FASTA Ediciones. https://confedi.org.ar/download/documentos_confedi/LIBRO-ROJO-DE-CONFEDI-Estandares-de-Segunda-Generacion-para-Ingenieria-2018-VFPublicada.pdf

Fava, M., Alcoba, J., & Montenegro Silba, E. B. J. (2023). *Estudiantes y la experiencia de recursar en la universidad: aportes para la reflexión pedagógica en tiempos de post pandemia*. Trayectorias Universitarias, 9(17), e147. https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/163503

Gutiérrez-Monsalve, J. A., Garzón, J., González-Gómez, D., & Segura-Cardona, A. M. (2023). *Factores asociados al rendimiento académico en ingeniería: un estudio correlacional descriptivo*. DYNA, 90(227). https://doi.org/10.15446/dyna.v90n227.107150

Ministerio de Educación de la Nación Argentina. (2021). Resolución Ministerial 1543/2021. https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resolución-1543-2021-349956/texto

# *TRABAJO FINAL ANÁLISIS DEL NIVEL DE ILUMINACIÓN SEGÚN PROTOCOLO RESOLUCIÓN SUPERINTENDENCIA DE RIESGOS DEL TRABAJO Nº 84/2012*

Ing. Qco. José Martín Glavas

*Campus Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) – Ciudad de Corrientes – Mayo 2025*
*josemartinglavas18@gmail.com*

**RESUMEN**

El análisis del nivel de iluminación en el Campus de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) realizado por la Asignatura Higiene y Seguridad Industrial del Quinto Año de la Carrera Ingeniería Industrial. En las mediciones se ha respetado las especificaciones técnicas del Protocolo de Iluminación de la Superintendencia de Riesgos del Trabajo (SRT) Nº 84/2012 de la República Argentina. Los seres humanos poseen una capacidad extraordinaria para adaptarse a su ambiente y a su entorno inmediato. De todos los tipos de energía que pueden utilizar los humanos, la luz es la más importante. La luz es un elemento esencial de la capacidad de ver y necesaria para apreciar la forma, el color y la perspectiva de los objetos que rodean a las personas. La mayor parte de la información que se obtiene a través de l os sentidos se obtiene por la vista (cerca del 80 %). Ahora bien, no se debe olvidar que ciertos aspectos del bienestar humano, como el estado mental o el nivel de fatiga, se ven afectados por la iluminación y por el color de las cosas que rodean.
Desde el punto de vista de la seguridad en el trabajo, la capacidad y el confort visuales son extraordinariamente importantes, ya que muchos accidentes se deben, entre otras razones, a deficiencias en la iluminación o a errores cometidos por el trabajador, a quien le resulta difícil identificar objetos o los riesgos asociados con la maquinaria, los transportes, los recipientes peligrosos, etc. Estas mediciones se realizaron en el Decanato (ambiente cerrado) y en el Acceso a Sala de Lectura (ambiente cerrado), se empleó un Medidor de Calidad Ambiental, Marca Sper Scientific.

El método de medición que frecuentemente se utiliza, es una técnica de estudio fundamentada en una cuadrícula de puntos de medición que cubre toda la zona analizada. La base de esta técnica es la división del interior en varias áreas iguales, cada una de ellas idealmente cuadrada. Se mide la iluminancia existente en el centro de cada área a la altura de 0,8 metros sobre el nivel del suelo y se calcula un valor medio de iluminancia. En la precisión de la iluminancia media influye el número de puntos de medición utilizados:

a) Lectura 1: 0,8 metros (Decanato sobre mesas de lecturas).
b) Lectura 2: 0,8 metros (Sala de Lectura también sobre las mismas mesas).

Los alumnos de esta asignatura se enfocaron al procesamiento de la información relevada en campo, con relación a los requerimientos normativos vigentes aplicables.

**Palabras clave:** Riesgo, Físico, Análisis, Iluminación, Color.

**ABSTRACT**

The analysis of the lighting level on the campus of the Faculty of Agricultural Sciences of the National University of the Northeast (UNNE) was carried out by the Industrial Hygiene and Safety course of the Fifth Year of the Industrial Engineering Program. The measurements adhered to the technical specifications of the Lighting Protocol No. 84/2012 of the Superintendency of Occupational Risks (SRT) of the Argentine Republic. Human beings have an extraordinary capacity to adapt to their environment and their immediate surroundings. Of all the types of energy humans can use, light is the most important. Light is an essential element of the ability to see and is necessary to appreciate the shape, color, and perspective of objects around us. Most of the information obtained through the senses is obtained

through sight (approximately 80%). However, it should not be forgotten that certain aspects of human well-being, such as mental state or fatigue levels, are affected by lighting and the color of the objects around us. From the point of view of safety at work, visual capacity and comfort are extraordinarily important, since many accidents are due, among other reasons, to deficiencies in lighting or to errors made by the worker, who finds it difficult to identify objects or risks associated with machinery, transport, dangerous containers, etc. These measurements were carried out in the Dean's Office (closed environment) and in the Reading Room Access (closed environment), using a Environmental Quality Meter, Sper Scientific brand.

The most frequently used measurement method is a survey technique based on a grid of measurement points that covers the entire area being analyzed. The basis of this technique is the division of the interior into several equal areas, each ideally square. The illuminance in the center of each area is measured at a height of 0.8 meters above floor level, and an average illuminance value is calculated. The accuracy of the average illuminance is influenced by the number of measurement points used:

a) Reading 1: 0.8 meters (Dean's Office on reading tables).
b) Reading 2: 0.8 meters (Reading Room also on the same tables).

Students in this course focused on processing the information collected in the field, in relation to the applicable current regulatory requirements.

Keywords: Risk, Physical, Analysis, Lighting, Color.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Los seres humanos poseen una capacidad extraordinaria para adaptarse a su ambiente y a su entorno inmediato. De todos los tipos de energía que pueden utilizar los humanos, la luz es la más importante. La luz es un elemento esencial de la capacidad de ver y necesaria para apreciar la forma, el color y la perspectiva de los objetos que los rodean.

La mayor parte de la información que se obtiene a través de los sentidos, se obtiene por la vista (cerca del 80 %).

Ahora bien, no se debe olvidar que ciertos aspectos del bienestar humano, como el estado mental o el nivel de fatiga, se ven afectados por la iluminación y por el color de las cosas a los alrededores.

Desde el punto de vista de la seguridad en el trabajo, la capacidad y el confort visuales son extraordinariamente importantes, ya que muchos accidentes se deben, entre otras razones, a deficiencias en la iluminación o a errores cometidos por el trabajador, a quien le resulta difícil identificar objetos o los riesgos asociados con la maquinaria, los transportes, los recipientes peligrosos, etcétera

Los requisitos que un sistema de iluminación debe cumplir para proporcionar las condiciones necesarias para el confort visual son:

- Iluminación uniforme.
- Iluminancia óptima.
- Ausencia de brillos deslumbrantes.
- Condiciones de contraste adecuadas.
- Colores correctos.
- Ausencia de efectos estroboscópicos.

## 2. ECUACIONES Y TABLAS.

El método de medición que frecuentemente se utiliza, es una técnica de estudio fundamentada en una cuadrícula de puntos de medición que cubre toda la zona analizada.
La base de esta técnica es la división del interior en varias áreas iguales, cada una de ellas idealmente cuadrada. Se mide la iluminancia existente en el centro de cada área a la altura de 0.8 metros sobre el nivel del suelo y se calcula un valor medio de iluminancia. En la precisión de la iluminancia media influye el número de puntos de medición utilizados. Existe una relación que permite calcular el número mínimos de puntos de medición a partir del valor del índice de local aplicable al interior analizado:

$$\text{Índice de local} = \frac{\textbf{Largo x Ancho}}{\textbf{Altura de Montaje x (Largo + Ancho)}}$$

Aquí el largo y el ancho, son las dimensiones del recinto y la altura de montaje es la distancia vertical entre el centro de la fuente de luz y el plano de trabajo. La relación mencionada se expresa de la forma siguiente:

Número mínimo de puntos de medición = $(x+2)^2$

Donde "x" es el valor del índice de local redondeado al entero superior, excepto para todos los valores de "Índice de local" iguales o mayores que 3, el valor de x es 4. A partir de la ecuación se obtiene el número mínimo de puntos de medición.
Una vez que se obtuvo el número mínimo de puntos de medición, se procede a tomar los valores en el centro de cada área de la grilla.
Cuando en recinto donde se realizará la medición posea una forma irregular, se deberá en lo posible, dividir en sectores cuadrados o rectángulos.

Luego se debe obtener la iluminancia media (E Media), que es el promedio de los valores obtenidos en la medición:

$$E\ Media = \frac{\sum \square\ \textbf{valores medidos (Lux)}}{\textbf{Cantidad de puntos medidos}}$$

Una vez obtenida la iluminancia media, se procede a verificar el resultado según lo requiere el Decreto N º 351/79 en su Anexo IV, en su Tabla 2, Ley Nº 19587/72 de Higiene y Seguridad en el Trabajo según el tipo de edificio, local y tarea visual. En el caso analizado por la asignatura será:

TABLA 2

Intensidad Mínima de Iluminación

(Basada en Norma IRAM-AADL J 20-06)

| Tipo de edificio, local y tarea visual | Valor mínimo de servicio de iluminación (lux) |
|---|---|
| Oficinas | |
| Halls para el público | 200 |
| Contaduría, tabulaciones, teneduría de libros, operaciones bursátiles, lectura de reproducciones, bosquejos rápidos | 500 |
| Trabajo general de oficinas, lectura de buenas reproducciones, lectura, transcripción de escritura a mano en papel y lápiz ordinario, archivo, índices de referencia, distribución de correspondencia | 500 |
| Trabajos especiales de oficina, por ejemplo sistema de computación de datos | 750 |

En Tabla 2, se seleccionó esa opción por las características edilicias de ambos lugares analizados (véase pág. Nº 3).

En caso de no encontrar en la Tabla 2 el tipo de edificio, el local o la tarea visual que se ajuste al lugar donde se realiza la medición, se deberá buscar la intensidad media de iluminación para diversas clases de tarea visual en la Tabla 1 y seleccionar la que más se ajuste a la tarea visual que se desarrolla en el lugar.

Una vez obtenida la iluminancia media, se procede a verificar la uniformidad de la iluminancia, según lo requiere el Decreto Nº 351/79 en su Anexo IV:

$$E\ Mínima \geq \frac{E\ Media}{2}$$

Donde la iluminancia Mínima (E Mínima), es el menor valor detectado en la medición y la iluminancia media (E Media) es el promedio de los valores obtenidos en la medición. Si se cumple con la relación, indica que la uniformidad de la iluminación está dentro de lo exigido en la legislación vigente.

La Tabla 4 de la misma ley, indica la relación que debe existir entre la iluminación localizada y la iluminación general mínima:

Tabla 4

Iluminación general Mínima

(En función de la iluminancia localizada)

(Basada en norma IRAM-AADL J 20-06)

| Localizada | General |
|---|---|
| 250 1x | 125 1x |
| 500 1x | 250 1x |
| 1.000 1x | 300 1x |
| 2.500 1x | 500 1x |
| 5.000 1x | 600 1x |
| 10.000 1x | 700 1x |

Esto indica que, si en el puesto de trabajo existe una iluminación localizada de 2. 500 lx, la iluminación general deberá ser de 500 lx, para evitar problemas de adaptación del ojo y provocar accidentes como caídas golpes, etc.

Nota: 1x = lux (unidad de medida para la iluminancia, es decir, la cantidad de luz que incide sobre una superficie)

## 3. DESARROLLO.

**PROTOCOLO PARA MEDICIÓN DE ILUMINACIÓN EN EL AMBIENTE LABORAL**

| Datos del Establecimiento | |
|---|---|
| Razón Social: Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) | |
| | |
| Dirección: Juan Bautista Cabral Nº 2131 | |
| | |
| Localidad: Corrientes | |
| | |
| Provincia: Corrientes | |
| | |
| CP: 3400 | CUIT Nº: 30 – 99900421 – 7 |

| Datos para la Medición | | |
|---|---|---|
| Marca, modelo y número de serie del instrumento utilizado:<br>Mini Medidor de Calidad Ambiental, Marca Sper Scientific y Modelo Nº 850027 | | |
| Fecha del certificado de calibración del instrumento utilizado en la medición: 09/01/2025 | | |
| Fecha de la medición: 28/05/2025 | Hora de inicio: 16:00 | Hora finalización: 18:00 |
| Condiciones atmosféricas:<br>Humedad Relativa = 75,0 %<br>Temperatura = 15,9 ºC<br>Presión = 1004,9 hPa | | |
| Horarios/turnos habituales de trabajo:<br>Miércoles de 16:00 a 20:00 | | |
| Describa las condiciones normales y/o habituales de trabajo:<br>Asignatura Higiene y Seguridad Industrial del Quinto Año de la Carrera de Ingeniería Industrial | | |
| Describa las condiciones de trabajo al momento de la medición:<br>Se realizaron mediciones del ambiente laboral en los distintos sectores de este campus, ellos son: Decanato y Sala de Lectura (véase pág. Nº 6) | | |

| Documentación que se Adjuntará a la Medición |
|---|
| Plano o croquis: Anexo I (veáse Foto Nº 1 pág. Nº 9)<br>Fotografías: Anexo II (veáse Fotos Nº 2 y 3 pág. Nº 9) |

**4. RESULTADOS.**

| PROTOCOLO PARA MEDICIÓN DE ILUMINACIÓN EN EL AMBIENTE LABORAL | | | |
|---|---|---|---|
| Razón Social: Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) | | | CUIT Nº: 30 – 99900421 – 7 |
| Domicilio: Juan Bautista Cabral Nº 2131 | Localidad: Corrientes | CP: 3400 | Provincia: Corrientes |

| Punto de Medición | Hora | Sector | Sección/Puesto/Puesto Tipo | Tipo de Iluminación: Natural/Artificial/ Mixta | Tipo de Fuente Lumínica: Incandescente/ Descarga/Mixta | Iluminación: General/ Localizada/Mixta | Valor de la uniformidad de Iluminancia E mínima ≥ (E media)/2 | Valor Medido [lux] | Valor requerido legalmente Según Anexo IV Dec. Nº 351/79 (véase pág. Nº 3) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 01 | 17:00 | Decanato | Administración | Mixta | Lámpara LED | General | 177 ≥ 113,4 | 226,9 | 500 |
| 02 | 17:15 | Sala de Lectura | Biblioteca | Mixta | Lámpara LED | General | 250 ≥ 165,5 | 330,9 | 500 |

Punto de muestreo Nº 1: Decanato, administración de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNNE.

Dimensiones de este punto:

- Largo 10 metros.
- Ancho 8 metros.
- Altura de montaje de las luminarias 5 metros, medidas desde el piso.
- Altura de la mesa de trabajo 0,8 metros (mediciones), medidas desde el piso.

Índice de local = $\frac{10 \times 8}{5 \times (10 + 8)} \approx 1$ (véase pág. Nº 3)

Número mínimo de puntos de medición = $(1+2)^2 = 9$ (véase pág. Nº 3)

| Punto 1 [lux] | Punto 2 [lux] | Punto 3 [lux] | Punto 4 [lux] | Punto 5 [lux] | Punto 6 [lux] | Punto 7 [lux] | Punto 8 [lux] | Punto 9 [lux] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 252 | 280 | 183 | 177 | 254 | 262 | 231 | 195 | 208 |

E mínima = 177 lux

E media = $\frac{\sum 2042 \text{ lux}}{9}$ = 226,9 lux → $\frac{\text{E media}}{2}$ = $\frac{226,9 \text{ lux}}{2}$ = 113,4 lux (véase pág. Nº 4)

Por lo tanto:

E mínima ≥ (E media)/2 = 177 lux ≥ 113,4 lux

Punto de muestreo Nº 2: Sala de Lectura, espacio físico en el cual funciona la biblioteca de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNNE.

Dimensiones de este punto:

- Largo 30 metros.
- Ancho 20 metros.
- Altura de montaje de las luminarias 7 metros, medidas desde el piso.
- Altura de la mesa de trabajo 0,8 metros (mediciones), medidas desde el piso.

Índice de local = $\frac{30 \text{ x } 20}{7 \text{ x } (30 + 20)}$ ≈ 2

Número mínimo de puntos de medición = $(2+2)^2$ = 16

| Punto 1 [lux] | Punto 2 [lux] | Punto 3 [lux] | Punto 4 [lux] | Punto 5 [lux] | Punto 6 [lux] | Punto 7 [lux] | Punto 8 [lux] | Punto 9 [lux] | Punto 10 [lux] | Punto 11 [lux] | Punto 12 [lux] | Punto 13 [lux] | Punto 14 [lux] | Punto 15 [lux] | Punto 16 [lux] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 304 | 310 | 317 | 326 | 250 | 275 | 281 | 299 | 411 | 400 | 320 | 364 | 333 | 312 | 388 | 405 |

E mínima = 250 lux

E media = $\frac{\sum 5295 \text{ lux}}{16}$ = 330,9 lux → $\frac{\text{E media}}{2}$ = $\frac{330,9 \text{ lux}}{2}$ = 165,5 lux

Por lo tanto:

E mínima ≥ (E media)/2 = 250 lux ≥ 165,5 lux

**5. CONCLUSIONES.**

| PROTOCOLO PARA MEDICIÓN DE ILUMINACIÓN EN EL AMBIENTE LABORAL | | | |
|---|---|---|---|
| Razón Social: Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) | | | CUIT Nº: 30 – 99900421 – 7 |
| Domicilio: Juan Bautista Cabral Nº 2131 | Localidad: Corrientes | CP: 3400 | Provincia: Corrientes |

| Análisis de Datos y Mejoras a Realizar | |
|---|---|
| Conclusiones | Recomendaciones para Adecuar el Nivel de Iluminación a la Legislación Vigente: |
| Se observa que los valores medidos en los diferentes sectores de este campus no cumplen con la normativa vigente de acuerdo al Anexo IV, Capítulo 12 Iluminación y Color, Decreto Reglamentario Nº 351/79 de la Ley Nº 19587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo (véase pág. Nº 6). Este deficit de iluminación, genera trastornos visuales (véase pág. Nº 2). | Se recomienda a esta facultad, poner en marcha un Programa de Mantenimiento Preventivo y Correctivo de todas las luminarias que consiste en realizar inspecciones, limpiar equipos, piezas y espacios de trabajo, sustituir elementos rotos o desgastados y repararlos si fuera necesario (véase pág. Nº 2). |

Anexo I:




Foto Nº 1

Nota: (1) Decanato (véase pág. Nº 6) y (2) Sala de Lectura (véase pág. Nº 7).

Anexo II:



Foto Nº 2
(véase pág. Nº 6)



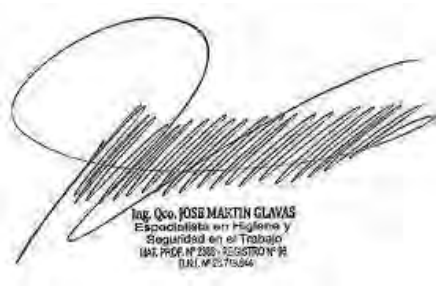
Foto Nº 3
(véase pág. Nº 7)

## 6. REFERENCIAS.

Higiene y Seguridad en el Trabajo (1972), Ley Nº 19587, Decreto Reglamentario (1979), Nº 351, Argentina.
SRT (Superintendencia de Riesgos del Trabajo), Página Web, www.srt.gob.ar, Argentina.
Manual de Operación, Mini Medidor de Calidad Ambiental, Marca Sper Scientific y Modelo Nº 850027, Estados Unidos.

**Agradecimientos**

o A mis padres Miguel y Lida que me dieron la vida; y me enseñaron la cultura del estudio y trabajo.



# ESTUDIO DE UN PROCESO DE ABSORCIÓN DE $CO_2$ EN AGUA, CON FINES DIDÁCTICOS, USANDO LOS SIMULADORES DWSIM, COCO (CHEM SEP)

Montesano, Juan[a1] Antoniuk, Laura[a1] Diego, García[a1]

*UNLa (Universidad Nacional de Lanús)/ a 1*

*juanmontesano45@gmail.com /a 1*

**RESUMEN**

La simulación de procesos industriales es una herramienta que permite reproducir virtualmente los procesos y estudiar su comportamiento, para analizar el impacto de las distintas variables que puedan intervenir en el mismo, o para comparar diferentes alternativas de diseño, sin el alto costo. Esta es de gran ayuda a la hora de disminuir los riesgos y optimizar la toma de decisiones, así como para planificar, analizar y mejorar los procesos. El trabajo de innovación educativa se centra en el impacto del uso de simuladores de procesos en el aprendizaje del grupo áulico. El objetivo es facilitar la comprensión de los procesos industriales y promover el aprendizaje autónomo entre los estudiantes. La simulación se realiza con los simuladores DWSIM y COCO de código abierto y descarga libre. Cabe destacar, que puede ejecutarse en diferentes sistemas operativos y requiere pocos requisitos de hardware para ser instalado. El proceso estudiado es la absorción de $CO_2$ en agua utilizando una torre de absorción Se inicia en el simulador DWSIM y COCO y se completa en el ChemSep teoría y práctica: Los estudiantes aplican conceptos teóricos de termodinámica, transferencia de masa y balances de materia a problemas de ingeniería realistas y aprenden a iterar entre ambos simuladores para optimizar la eficiencia de la absorción y minimizar los costos.
Se espera que esta herramienta influya positivamente en el aprendizaje de los estudiantes, fomentando tanto el trabajo individual como el colaborativo y la socialización, enriqueciendo así la experiencia educativa.

**Palabras Claves:** DWSIM, COCO, ChemSep, Absorción, $CO_2$ en agua,

**ABSTRACT**

Industrial process simulation is a tool that allows for the virtual reproduction of processes and the study of their behavior, in order to analyze the impact of the different variables that may intervene in the process, or to compare different design alternatives, without the high cost. This is of great help in reducing risks and optimizing decision-making, as well as in planning, analyzing, and improving processes. The educational innovation work focuses on the impact of the use of process simulators on classroom learning. The objective is to facilitate the understanding of industrial processes and promote independent learning among students. The simulation is carried out using the open-source DWSIM and COCO simulators, which is freely downloadable. It should be noted that it can be run on different operating systems and requires few hardware requirements for installation. The process studied is the absorption of $CO_2$ in water using an absorption tower. It begins with DWSIM and COCO and is completed in ChemSep. Complements theory and practice: Students apply theoretical concepts of thermodynamics, mass transfer, and material balances to realistic engineering problems and learn to iterate between both simulators to optimize absorption efficiency and minimize costs.
This tool is expected to positively influence student learning, encouraging both individual and collaborative work and socialization, thus enriching the educational experience.

**Keywords:** DWSIM, COCO, ChemSep, Absorption, $CO_2$ in water

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente material busca introducir a los estudiantes de la carrera de Alimentación de la Universidad Nacional de Lanús (UNLa) en la simulación de procesos, enfocándose específicamente en la absorción de dióxido de carbono ($CO_2$) en agua utilizando los simuladores DWSIM y ChemSep. En un contexto global donde la sostenibilidad y la eficiencia de los procesos son pilares fundamentales, y en una región con una creciente demanda de profesionales capacitados en la industria alimentaria, la comprensión profunda de fenómenos como la absorción de gases resulta esencial. El $CO_2$ es un gas omnipresente en esta industria, siendo protagonista tanto en procesos deseables como la carbonatación de bebidas (refrescos, cervezas, etc.), como en subproductos de fermentaciones que requieren gestión o potencial reutilización.

La simulación de procesos mediante herramientas informáticas ha revolucionado la ingeniería, permitiendo a los profesionales diseñar, analizar y optimizar sistemas complejos sin la necesidad de costosos y prolongados experimentos a escala real. Para los futuros profesionales en alimentos de la UNLa, dominar estas herramientas no solo consolidará su comprensión de los principios fundamentales de la ingeniería química y de procesos, sino que también los equipará con habilidades altamente demandadas en el mercado laboral.

Tanto COCO como DWSIM son excelentes simuladores de código abierto, y su capacidad de interactuar a través del estándar CAPE-OPEN, especialmente con herramientas como ChemSep, maximiza su utilidad. DWSIM actúa como un "anfitrión" flexible para los potentes módulos de cálculo de columnas de ChemSep, permitiendo a los estudiantes aprovechar lo mejor de ambos mundos.

El ChemSep es un módulo especializado en el diseño y simulación rigurosa de columnas de separación, incluyendo absorbedores. Aunque puede funcionar de forma independiente, su integración con DWSIM (a través del estándar CAPE-OPEN) permitirá a los estudiantes pasar de una simulación general del proceso a un diseño detallado y preciso del equipo de absorción.

A lo largo de este estudio, los estudiantes explorarán cómo configurar las propiedades de las sustancias ($CO_2$ y agua), seleccionar los modelos termodinámicos adecuados para describir su interacción, y diseñar una columna de absorción para alcanzar objetivos específicos, como un determinado nivel de carbonatación o una eficiencia de remoción de $CO_2$. Se abordará la importancia de parámetros como la temperatura, presión, caudales y las características internas de la columna en el rendimiento del proceso.

El objetivo final es que los estudiantes de Alimentación de la UNLa desarrollen la capacidad de utilizar estas potentes herramientas de simulación para resolver problemas prácticos relacionados con el $CO_2$ en la industria alimentaria, desde la optimización de líneas de bebidas carbonatadas hasta el diseño de sistemas para la recuperación o gestión de $CO_2$ en bioprocesos, contribuyendo así a la innovación y sostenibilidad del sector

## 2. Objetivos Generales:

**2.1** Fomentar la comprensión profunda de los procesos de absorción de gases: Capacitar a los estudiantes para que comprendan los fundamentos teóricos y prácticos de la absorción de CO2 en agua, incluyendo la transferencia de masa, el equilibrio de fases y los factores que afectan la eficiencia del proceso.

**2.2** Desarrollar habilidades en el uso de software de simulación de procesos: Familiarizar a los estudiantes con herramientas computacionales estándar en la industria (DWSIM, COCO y ChemSep) para el diseño, análisis y optimización de procesos químicos.

**2.3** Promover el pensamiento crítico y la resolución de problemas: Estimular la capacidad de los estudiantes para analizar diferentes escenarios de operación, identificar problemas y proponer soluciones basadas en los resultados de las simulaciones.

**2.4** Reducir la brecha entre la teoría y la práctica: Ofrecer una experiencia de aprendizaje interactiva que complemente las clases teóricas, permitiendo a los estudiantes aplicar conceptos abstractos a problemas reales y visualizar el comportamiento de sistemas complejos.

**2.5** Incentivar la investigación y el diseño de procesos sostenibles: Sensibilizar a los estudiantes sobre la importancia de la captura de $CO_2$ como estrategia para mitigar el cambio climático y capacitarlos para diseñar procesos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente.

## 3. Objetivos Particulares:

**3.1** Modelar y simular el proceso de absorción de $CO_2$ en agua: Que los estudiantes sean capaces de construir diagramas de flujo de procesos en DWSIM y COCO, seleccionando los modelos termodinámicos apropiados y definiendo las condiciones de operación (temperatura, presión, flujos, etc.).

**3.2** Analizar el impacto de diferentes parámetros operativos en la eficiencia de la absorción: Permitir que los estudiantes investiguen cómo variaciones en la concentración de $CO_2$ en la corriente de entrada, el flujo de agua, la temperatura y la presión afectan la cantidad de $CO_2$ absorbido y la pureza del gas de salida.

**3.3** Diseñar y optimizar columnas de absorción física. Las moléculas se dispersan y ocupan el volumen interno del absorbente, sin que ocurra una reacción química. Utilizar ChemSep para el diseño de columnas de absorción de platos o empaque, determinando el número de platos teóricos o la altura de empaque necesaria para lograr una separación deseada.

**3.5** Interpretar y presentar resultados de simulación: Capacitar a los estudiantes para analizar los datos generados por las simulaciones, extraer conclusiones significativas y comunicar estos resultados de manera clara y concisa a través de informes técnicos y presentaciones.

**3.6** Realizar análisis de sensibilidad y optimización de procesos: Que los estudiantes exploren cómo las incertidumbres en los datos de entrada pueden afectar los resultados y cómo se pueden optimizar los parámetros del proceso para maximizar la absorción o minimizar los costos.

**3.7** Comparar los resultados de la simulación con datos experimentales o teóricos: Fomentar el espíritu crítico al comparar los resultados obtenidos con los simuladores con datos de la literatura o con cálculos manuales simplificados, identificando las limitaciones y las aproximaciones de cada método.

**3.8** Resolver problemas específicos de diseño y operación relacionados con la captura de $CO_2$: Proponer a los estudiantes escenarios reales o hipotéticos donde deban aplicar las herramientas de simulación para resolver desafíos relacionados con la captura y el uso de $CO_2$.

Estos objetivos buscan asegurar que los estudiantes adquieran tanto los conocimientos teóricos como las habilidades prácticas necesarias para enfrentar los desafíos de la ingeniería de procesos en el ámbito de la captura de $CO_2$, utilizando herramientas computacionales de vanguardia.

## 4. PARTE ANALÍTICA

### 4.1 Definición del Caso Base (Especificaciones del Problema):

Objetivo de la simulación: Calcular la cantidad de $CO_2$ absorbido, determinar el tamaño de la columna, optimizar la eficiencia de remoción de $CO_2$).
Sustancias involucradas: $CO_2$, Agua ($H_2O$), y posiblemente otros gases si la corriente de entrada no es $CO_2$ (ej. $N_2$, $O_2$ si es un gas de chimenea o de fermentación).
Condiciones de entrada: Corriente de Gas ($CO_2$ + otros): Caudal (1 kg/s), composición (1 fracción molar de $CO_2$, temperatura 0ºC, presión inicial 1500 kPa.
Corriente de Líquido (Agua): Caudal 1kg/s, temperatura 0°C, presión 1500 kPa.
Condiciones de salida/especificaciones del absorbedor: Corrientes en cabeza de torre (Top) $CO_2$ remanente. Corriente (Bottom) Agua carbonatada

### 4.2 Configuración en el Simulador (DWSIM)

Creación de un nuevo caso: Abrir DWSIM y crear un nuevo proyecto.
Selección de componentes: Añadir $CO_2$ y $H_2O$ a la lista de componentes del caso.
Elección del paquete de propiedades termodinámicas: Este es un paso CRÍTICO para la absorción de gases. Para $CO_2$ y agua, se usa como Ecuación de Estado a Peng-Robinson**.** El modelo termodinámico en la torre es K- Value: DECHEMA, Coeficiente de actividad: Solución ideal, Presión de vapor : Antoine y Entalpía: Ideal

### 4.3 Construcción del diagrama de flujo:

Arrastrar una unidad de "Operación Unitaria CAPE-OPEN" desde la paleta de DWSIM al área de trabajo. Esto nos permitirá conectar con ChemSep.
Crear las corrientes de materia .Entrada ($CO_2$, Agua) Salida ($CO_2$ remanente, Agua carbonatada) y conectarlas a la operación CAPE-OPEN (columna de absorción).

| PROPERTIES TABLE | | | |
|---|---|---|---|
| Agua | Temperatura | 0 | C |
| Agua | Presión | 1500 | kPa |
| Agua | Flujo másico | 1 | kg/s |
| Agua carbonatada | Temperatura | 22,418 | C |
| Agua carbonatada | Presión | 1500 | kPa |
| Agua carbonatada | Flujo másico | 1,81218 | kg/s |
| Agua carbonatada | Flujo molar | 73,9589 | mol/s |
| CO2 | Temperatura | 0 | C |
| CO2 | Presión | 1500 | kPa |
| CO2 | Flujo másico | 1 | kg/s |
| CO2 | Flujo molar | 22,7224 | mol/s |
| CO2 remanente | Temperatura | 19,1195 | C |
| CO2 remanente | Presión | 1500 | kPa |
| CO2 remanente | Flujo másico | 0,187825 | kg/s |
| CO2 remanente | Flujo molar | 4,27189 | mol/s |

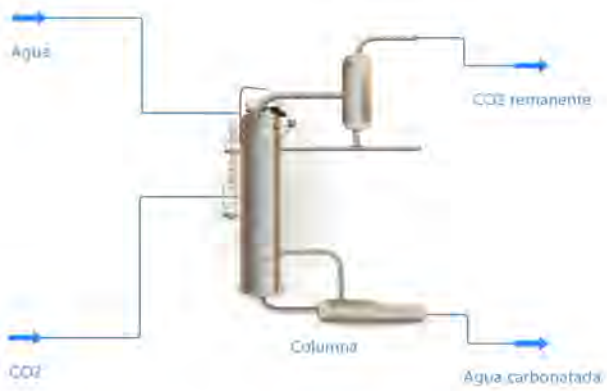
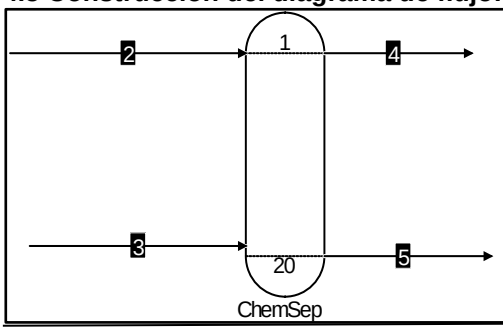



*Figura 1. Copia del diagrama de flujo de la columna de absorción con tabla de propiedades DWSIM*

### 4.4 Configuración en el simulador (COCO)

ChemSep como Operación Unitaria en COCO: Debido a la compatibilidad CAPE-OPEN, ChemSep se puede insertar como una operación unitaria de columna dentro de un diagrama de flujo de COCO. Esto significa que se puede simular una planta completa en COCO y utilizar ChemSep para modelar rigurosamente las columnas de destilación o absorción dentro de ese proceso general. COCO no tiene su propio modelo de columna complejo, por lo que se apoya en ChemSep para esta funcionalidad.
Propiedades Termodinámicas Compartidas: Las rutinas de cálculo de propiedades de COCO (TEA) están basadas en gran parte en las de ChemSep, lo que asegura una buena consistencia termodinámica cuando se usan ambas herramientas en conjunto.
Enfoque Complementario: COCO proporciona el marco para la simulación de procesos a gran escala, mientras que ChemSep ofrece la profundidad y el rigor necesarios para las operaciones de separación, que son a menudo los "cuellos de botella" y las unidades más complejas en una.

### 4.5 Construcción del diagrama de flujo:




| Stream | 3 | 2 | 4 | 5 | Unit |
|---|---|---|---|---|---|
| Pressure | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | kPa |
| Temperature | 0 | 0 | 19.7349 | 22.418 | °C |
| Flow rate | 1 | 1 | 0.187825 | 1.81218 | kg / s |
| Mole frac Water | 0 | 100 | 0.161342 | 75.0438 | % |
| Mole frac Carbon dioxide | 100 | 0 | 99.8387 | 24.9562 | % |
| Flow Carbon dioxide | 1 | 0 | 0.1877 | 0.8123 | kg / s |
| Flow Water | 0 | 1 | 0.000124168 | 0.999876 | kg / s |

*Figura 2. Copia del diagrama de flujo de la columna de absorción con tabla de propiedades COCO*

### 4.6 Configuración Detallada de la Columna de Absorción (a través de ChemSep):

Al hacer doble clic en la operación CAPE-OPEN en DWSIM, se abrirá la interfaz de ChemSep (o un subinterfaz dentro de DWSIM que representa ChemSep).
Tipo de columna: para una absorción, elige "Absorber" o "Stripper"
Número de etapas/secciones: Define el número de platos teóricos (20).
Presión: especifica la presión de la columna, 1500 kPa (inicialmente) luego se ajustará ya sea un valor fijo o un perfil (presión de la cabeza y del fondo).
Definir las corrientes de alimentación (Feeds) y de producto (Products):
Elegir el método de cálculo de la columna. Equilibrium Stage Model (Modelo de Etapa de Equilibrio): Asume que el equilibrio termodinámico se alcanza en cada etapa. Es más sencillo y rápido, pero menos preciso para absorción donde la transferencia de masa puede ser limitante. Aquí solo necesitas el número de platos teóricos y, opcionalmente, eficiencias de plato.
Definir las especificaciones de la columna (Convergence Specifications):
Para que la columna converja, se necesita decirle a ChemSep qué quieres que calcule o qué valores de salida deseas lograr.

### 4.6.1. Ejemplos de especificaciones para una absorción:

En la corriente “Agua carbonatada “se puede ajustar el porcentaje de $CO_2$ que se desea absorber. Modificando la presión de la columna a 1500 kPa, se fabrica soda con una composición de ¾ de $H_2O$ y ¼ $CO_2$ en fracción molar (0.757276 de agua y 0.242724 de $CO_2$). Ver Figura 3
Con el estudio paramétrico (Analysis→Parametric Study) se determina la cantidad óptima de platos (20).

### 4.6.2. Ejecutar la simulación:

La simulación se inicia en COCO o en DWSIM y se pasa al complemento ChemSep. Una vez que se haya definido todo, se busca un botón como "Run", "Solve" para iniciar la simulación. ChemSep intentará resolver el sistema de ecuaciones para encontrar un estado estable que cumpla con tus especificaciones. Si la simulación converge, ChemSep mostrará los resultados.
Resultados clave a revisar: Caudales y composiciones de las corrientes de salida: ¿Cuánto $CO_2$ se absorbió? ¿Qué pureza tiene el gas de salida?
Perfiles de la columna: ChemSep permite ver gráficos de los perfiles de temperatura, presión, composición de fase líquida y vapor, caudales a lo largo de la columna (plato por plato o altura por altura). Esto es crucial para entender el comportamiento interno. Rendimiento de la columna: Eficiencia de absorción, caída de presión.

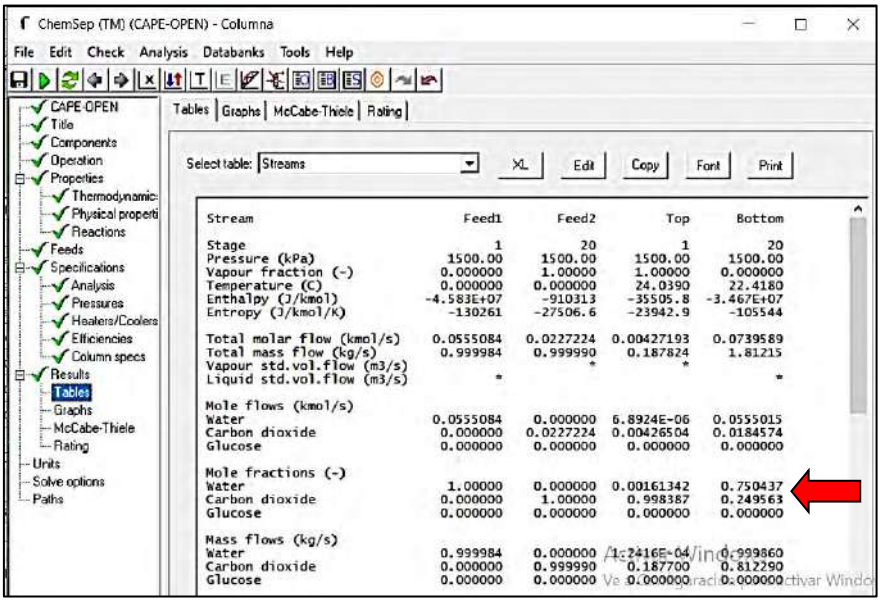



*Figura 3. Copia de pantalla de columna de absorción ChemSep*

*Tabla 1. Copia de Rating simulador ChemSep*

| | |
|---|---|
| Section | 1 |
| Start stage | 1 |
| End stage | 2 |
| System factor | 1 |
| Flood fraction | 0.75 |
| Efficiency estimated | 0.74 |
| HETS estimated (m) | 0.811 |
| FPL/Maldistribution | 1 |
| Area fraction | 1 |
| Flow parameter | 0.29 |
| Capacity factor (m/s) | 0.054 |
| Diameter section (m) | 0.38 |
| Design stage | 2 |
| Heightsection (m) | 1.8 |
| Diameter (m) | 0.38 |
| Height (m) | 4.94 |

## 5 Limitaciones

DWSIM, aunque es un programa gratuito impresionante, tiene sus limitaciones: Los solucionadores no son tan robustos. Si se empieza lejos de una solución, no hay que esperar, que converja. Para la simulación de reactores, no permite aplicar cinéticas biológicas (sumamente útiles, en la industria de alimentos). En cuanto a COCO presenta algunos problemas de convergencia al simular equipos complejos de forma simultánea, lo que dificulta el estudio del proceso a diferentes escalas. Además, al ingresar algunos cálculos y ecuaciones que el programa no puede resolver, este se vuelve inestable.
En el modelo, no ocurre una reacción química adicional entre el absorbato y el absorbente, formando un nuevo compuesto. El $CO_2$ (absorbato) se disuelve o se captura dentro del absorbente. El modelo termodinámico responde, a un coeficiente de actividad ideal.

## 6. Conclusiones

La simulación, se presenta como una herramienta altamente beneficiosa para los estudiantes de la carrera de Alimentos en la Universidad de Lanús. A partir de la información disponible, se pueden extraer las siguientes conclusiones sobre su utilidad:
La simulación facilita la visualización de fenómenos complejos, como la transferencia de calor o masa. Esto es crucial para entender procesos que son difíciles de observar directamente en un laboratorio tradicional.
Se ha generado una torre de absorción pasando de DWSIM al programa complemento (ChemSep); con una eficiencia del 74% de 0.38 m de diámetro y 4.94m de alto. (Tabla1).
Permite realizar un estudio económico abriendo la ventana Complementos→Capital Cost Estimator (Trial Versión).
Posee una planilla de cálculo Excel. Permite importar y exportar datos desde la planilla a las corrientes y equipos y viceversa.
Como instrumento didáctico, los estudiantes pueden experimentar con diferentes variables, parámetros de diseño o funcionamiento de un proceso, y observar sus efectos sin incurrir en costos, riesgos de seguridad o desperdicio de materiales, algo que sería imposible en un laboratorio real o una planta piloto.
Al poder modificar parámetros y observar los resultados, los estudiantes desarrollan la habilidad de tomar decisiones informadas, evaluando el impacto de cada cambio en la eficiencia, seguridad y calidad de los procesos. Optimizar el rendimiento de equipos, procesos, y mejorar la eficiencia general de una línea de producción.
Permite a los futuros profesionales de alimentos diseñar y optimizar el layout de una planta, la disposición de los equipos, y evaluar la viabilidad de nuevas instalaciones antes de cualquier inversión física.

En resumen, la simulación ofrece a los estudiantes de la carrera de Alimentos de la Universidad de Lanús una experiencia de aprendizaje inmersiva y práctica que complementa la formación teórica. Les proporciona las habilidades y el conocimiento necesarios para enfrentar los desafíos de la industria alimentaria, optimizar procesos, garantizar la calidad e inocuidad de los productos, y contribuir al desarrollo sostenible del sector.

## 7. REFERENCIAS


Scenna, N.J. (1999) *Modelado, simulación y optimización de procesos químicos*. (1ª ed.)Buenos Aires: UTN Autor- Editor Dr. Nicolás Scenna

Cañizares Gutiérrez, C.D. (2021) *Estudio comparativo de cálculo de propiedades entre los programas de simulación: el caso de UNISIM y DWSIM* (1a ed.) España: Universidad de la Laguna Colecciones TFG Ingeniería química industrial

Jiménez Ocaña, J.C.(2018) *Simulación de procesos*(1ª ed.) México: Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

Mac Cabe, W., Smith, J., Harriot, P. (2005). *Unit Operations of Chemical Engineering*.EE.UU: Mc Graw Hill.

Cengel, Y. y Boles, M.A. (2003) *Termodinámica* (5a ed.). México: MC GRAW HILL

Rodríguez, B.P. (2019) *Simulación de procesos químicos con COCO simulador. (*1a ed*.)* Republic of Moldova: OEM

Iglesias, O. A. y Paniagua C. N. (2013) *Conceptos básicos de simulación de procesos*. (1a ed.) Buenos Aires: Editorial de la Universidad Nacional de la Plata.

Guerrero Martínez, A. D. (2021) *Introducción al programa UNISIM.* Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=isPDBKIWS9M

Scenna, N.J. (2022*)* *Introducción a DWSIM 2022.* Recuperado dehttps://www.modeladoeningenieria.edu.ar/images/IntegracionIII/Material-propio/08_DWSIM-simplificado.pdf

# INGENIERÍA CON PROPÓSITO: LA EXPERIENCIA DE LOS PROYECTOS DE ÍNDOLE SOCIOAMBIENTAL EN LA FORMACIÓN DE INGENIEROS INDUSTRIALES

Gómez, Daniela; Guzmán, Eliseo; Stagnitta, Verónica

*Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario*
*danielag@fceia.unr.edu.ar; eguzman@fceia.unr.edu.ar; vastagnitta@fceia.unr.edu.ar*

**RESUMEN**

El presente trabajo expone la experiencia de un grupo de estudiantes de Ingeniería Industrial que eligió desarrollar proyectos con impacto socioambiental como parte de su formación académica. La decisión de orientar el proyecto hacia una problemática real de la comunidad respondió a la necesidad de aplicar los conocimientos técnicos en un contexto con propósito social y ambiental, más allá de los objetivos económicos tradicionales.

Durante el proceso, los estudiantes enfrentaron diversas dificultades, como la falta de recursos, limitaciones en la articulación con actores comunitarios, y la necesidad de adaptar herramientas teóricas a un entorno dinámico y muchas veces imprevisible. Sin embargo, estas dificultades representaron oportunidades de aprendizaje profundo, resiliencia y trabajo colaborativo.

Entre las experiencias más gratificantes se destacan el vínculo con la comunidad beneficiaria, el impacto tangible del proyecto y el sentido de pertenencia que se generó al trabajar con un fin trascendente. Los estudiantes observaron que el proyecto no solo les permitió aplicar herramientas propias de la carrera —como gestión de proyectos, análisis de procesos, logística y evaluación de impacto—, sino que también fortaleció habilidades blandas como la empatía, la comunicación y el liderazgo.

Finalmente, se brindan recomendaciones para otros compañeros que deseen embarcarse en proyectos similares: buscar asesoramiento interdisciplinario, mantener una escucha activa con la comunidad, documentar el proceso de forma rigurosa y estar abiertos a la transformación personal que implica trabajar con y para otros. Este trabajo invita a repensar el rol del ingeniero industrial como agente de cambio social, capaz de integrar eficiencia con compromiso y sostenibilidad.

**Palabras Claves:** Proyectos finales - Impacto socioambiental - Compromiso

**ABSTRACT**

This paper presents the experience of a group of Industrial Engineering students who chose to develop projects with a socio-environmental impact as part of their academic training. The decision to focus the project on a real community problem responded to the need to apply technical knowledge in a context with a social and environmental purpose, beyond traditional economic objectives.

During the process, the students faced various difficulties, such as a lack of resources, limitations in coordination with community stakeholders, and the need to adapt theoretical tools to a dynamic and often unpredictable environment. However, these difficulties represented opportunities for deep learning, resilience, and collaborative work.

Among the most rewarding experiences were the connection with the beneficiary community, the tangible impact of the project, and the sense of belonging generated by working toward a transcendent goal. The students identified that the project not only allowed them to apply program-specific tools—such as project management, process analysis, logistics, and impact assessment—but also strengthened soft skills such as empathy, communication, and leadership. Finally, recommendations are offered for other students who wish to embark on similar projects: seek interdisciplinary advice, actively listen to the community, rigorously document the process, and be open to the personal transformation that comes with working with and for others. This work invites us to rethink the role of the industrial engineer as an agent of social change, capable of integrating efficiency with commitment and sustainability.

**Keywords:** Final Projects - Socio-environmental Impact - Commitment

## 1. INTRODUCCIÓN

La formación de ingenieros en el siglo XXI enfrenta el desafío de responder a un entorno caracterizado por una creciente complejidad, incertidumbre y profundas transformaciones sociales, ambientales y tecnológicas. En este contexto, las carreras de Ingeniería —y particularmente la Ingeniería Industrial— están llamadas a revisar sus enfoques formativos tradicionales, incorporando una mirada más integral que incluya no solo la eficiencia productiva, sino también el compromiso ético, la sostenibilidad y la responsabilidad social (Pérez Rave, 2014). En efecto, ya no basta con formar profesionales técnicamente competentes; se requiere que los futuros ingenieros comprendan el impacto de sus decisiones en la sociedad y el ambiente, y que sean capaces de actuar como agentes de cambio en pos del bien común.

La Ingeniería Industrial, históricamente centrada en la mejora de procesos, la gestión de recursos y la optimización de sistemas, posee herramientas particularmente valiosas para intervenir en problemáticas complejas, incluyendo aquellas de índole socioambiental. La aplicación de metodologías como el análisis de procesos, la evaluación de impacto, la planificación estratégica y la gestión de proyectos permite estructurar intervenciones eficaces en diversos contextos. Sin embargo, estas herramientas cobran un sentido más profundo cuando se articulan con necesidades reales de comunidades, especialmente en ámbitos donde las desigualdades sociales y los problemas ambientales se entrelazan (López Cerezo & Luján, 2000).

En este marco, el desarrollo de proyectos socioambientales en el ámbito universitario se convierte en una estrategia pedagógica valiosa para conectar la teoría con la práctica, el aula con el entorno, y los saberes técnicos con valores como la solidaridad, la empatía y la participación. Las experiencias de aprendizaje basadas en problemas reales y con impacto en la comunidad permiten a los estudiantes no solo aplicar conocimientos adquiridos, sino también resignificarlos a partir de la interacción con contextos dinámicos, imprevisibles y muchas veces desafiantes (UNESCO, 2017) y la responsabilidad ciudadana (Martín Mateos, 2023). Estas experiencias promueven el desarrollo de habilidades como la comunicación efectiva, el liderazgo, el trabajo en equipo, la gestión del conflicto y la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre (Tamayo y Tamayo, 2004).

Por otra parte, se evidencia una creciente demanda social hacia los profesionales de la ingeniería, no solo para que contribuyan al desarrollo económico, sino también para que participen activamente en la construcción de una sociedad más justa y sostenible. Tal como señala la UNESCO (2017), la educación superior tiene un papel clave en la formación de ciudadanos comprometidos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), capaces de integrar el conocimiento científico y técnico con valores éticos y sociales.

Este trabajo presenta la experiencia de un grupo de estudiantes de Ingeniería Industrial, ahora ingenieros, ya que con el proyecto final se graduaron, que, en el marco de su formación académica, optó por desarrollar un proyecto con impacto socioambiental, priorizando una necesidad concreta de la comunidad. A lo largo del proceso, se enfrentaron a múltiples desafíos —desde limitaciones materiales hasta dificultades en la articulación con actores —, que lejos de ser obstáculos, se convirtieron en oportunidades de aprendizaje profundo y transformación personal. La experiencia permitió aplicar herramientas propias de la disciplina, al tiempo que fortaleció competencias humanas y sociales fundamentales para el ejercicio profesional responsable. Asimismo, brindó la posibilidad de repensar el sentido de la ingeniería, vinculándola con valores como la equidad, la sostenibilidad y el compromiso con el otro.

A través de esta experiencia se pone en discusión una visión tradicionalmente tecnocrática de la ingeniería y se propone una mirada más humanista e integrada, en la que el conocimiento técnico se orienta al servicio de las personas y del entorno. Esta perspectiva no solo enriquece la formación académica, sino que también fortalece el vínculo entre la universidad y la sociedad, promoviendo prácticas transformadoras y socialmente relevantes.

## 2. DESARROLLO

### 2.1 Descripción de Proyectos finales

#### 2.1.1 Proyecto “Puesta en funcionamiento de la Unidad de Procesamiento de Alimentos para una organización social sin fines de lucro” de los alumnos Ametller Ulises - Kyska Iván

Este proyecto, realizado en Argentina en el año 2024, encuentra al país inmerso en su contexto político, económico y social donde, según el último dato del INDEC al momento, el 41,7% de la población se encuentra debajo de la línea de la pobreza. Como consecuencia de ello, según el Registro Nacional de

Comedores y Merenderos Comunitarios (ReNaCoM), en el país hay 34.782 comedores en los que colaboran 134.449 personas; donde en cada uno comen hasta 300 familias por día.
De acuerdo al Proyecto Atlas de Políticas Globales de Donación de Alimentos, elaborado por la Clínica de Leyes y Políticas Alimentarias (FLPC) de la Facultad de Derecho de Harvard y la Red Mundial de Bancos de Alimentos (GFN), cada año Argentina pierde 14.5 millones de toneladas de alimentos durante las etapas de producción, procesamiento y distribución de la cadena de suministro y desperdicia 1.5 millones de toneladas adicionales de alimentos a nivel del minorista o consumidor.
Dentro de este contexto, existen distintos agentes cuyo propósito es contribuir a la seguridad alimentaria de las personas más vulnerables. En Rosario, uno de ellos es el Banco de Alimentos Rosario (BAR). El BAR es una asociación civil sin fines de lucro que busca recuperar alimentos aptos para consumo y distribuirlos a aquellas organizaciones beneficiarias, quienes lo utilizan para asistir a las personas que se encuentran en esta situación.
La motivación del proyecto fue colaborar con esta institución contribuyendo a un mejor bienestar general de la sociedad a través de la optimización de la asistencia de las personas más vulnerables. Este proyecto tuvo como propósito poner en funcionamiento la Unidad de Procesamiento de Alimentos (UPA), perteneciente a BAR, que le permite a la organización realizar un mejor aprovechamiento de frutas y verduras donadas, a través de la cocción y/o congelamiento, para prolongar su vida útil y ofrecer una nueva variedad de productos de alto valor nutricional a todas las organizaciones beneficiarias.

### 2.1.2 Proyecto “Mejora integral de las operaciones logísticas del depósito del Banco de Alimentos de Rosario” de los alumnos Del Valle Camila Tamara - Domenech José Ignacio.

La principal motivación para realizar este proyecto fue la posibilidad de vincular a los alumnos con una organización de alto impacto social en la comunidad, pudiendo además emplear los conocimientos adquiridos en un caso práctico de aplicación.
El desafío se centró en optimizar las operaciones de almacenamiento y distribución interna del depósito del Banco de Alimentos de Rosario. Adoptando una actitud crítica y creativa en la identificación, análisis y resolución de problemas, se asumió el rol de actores sociales para transformar el entorno, brindando alternativas para mejorar la operatoria y ampliar la capacidad de respuesta.
El proyecto se enfocó en las operaciones del depósito, ya que su eficiencia y organización son fundamentales para asegurar que los alimentos lleguen de manera oportuna, segura e inocua a quienes más lo necesitan. En este contexto, el depósito no es solo un lugar de almacenamiento sino también una pieza clave en la cadena de suministros del Banco de Alimentos de Rosario, impactando directamente en la capacidad de respuesta y en la calidad del servicio ofrecido a la comunidad.
A lo largo de todo el proyecto, se tuvieron en cuenta dos características fundamentales: las restricciones de recursos y la naturaleza impredecible de las donaciones recibidas. Las soluciones propuestas buscaron ser implementables y sostenibles, sin la necesidad de inversiones significativas en infraestructura y tecnología.

### 2.1.3 Proyecto “Análisis de factibilidad técnica, económica y financiera de una planta productora de alimento balanceado para animales de laboratorio” de las alumnas Menini Florencia - Guerzoni Guillermina.

La alimentación adecuada de los animales de laboratorio es fundamental para garantizar la validez de los resultados en investigaciones científicas en medicina, veterinaria y bioquímica. Una dieta inapropiada puede comprometer los estudios, desperdiciando recursos materiales, económicos y humanos, obstaculizando el avance en tratamientos médicos, farmacológicos y científicos.
Los bioterios y centros de investigación de Argentina, entre ellos los pertenecientes a la Universidad Nacional de Rosario (UNR), enfrentan serios desafíos para alimentar correctamente a sus animales de experimentación, principalmente a roedores. Esto es debido a que los proveedores de dichos alimentos ofrecen productos de composición única (cuando a veces el estudio necesita adaptar los componentes alimenticios que se les proporciona a los animales), no demasiado controlada y a un precio alto. Esta problemática afecta no solo a los centros y laboratorios públicos y privados, sino también a la sociedad en general, que depende de los avances científicos para la mejora de su salud y bienestar.
El proyecto se enfocó en analizar la factibilidad técnica, económica y financiera de una planta productora de alimento balanceado para animales de laboratorio. El objetivo fue abordar y resolver las dificultades actuales en la adquisición de este alimento, contribuyendo así a mejorar las condiciones de investigación y, por consiguiente, estimular el desarrollo científico.

### 2.1.4 Proyecto “Diseño y análisis técnico de una planta pública de elaboración de alimentos, de alto valor nutricional, para garantizar su acceso a sectores vulnerables” de los alumnos Banchio Nazareno - Cabral Mercedes - Calzia Miqueas - Huber Alexis.

Al observar la crítica situación alimentaria que afecta a Rosario y la región, se decidió desarrollar un proyecto que ayude a combatir la inseguridad alimentaria y contribuya a mejorar la calidad de vida de las poblaciones vulnerables de la zona.
La propuesta inicial del proyecto surge a partir de la iniciativa del área de Extensión y Territorio de la UNR como parte de la convocatoria del programa "Ciencia y Tecnología contra el Hambre 2020", aprobado en 2021.
El proyecto consistió en el diseño y análisis técnico de una planta pública elaboradora de alimentos deshidratados de alto valor nutricional que permita garantizar el acceso de estos productos a los sectores más vulnerables. El estudio abarcó desde el abastecimiento, producción hasta la distribución de los alimentos.
Para el desarrollo de esta propuesta, fueron de gran inspiración trabajos previos de estudiantes que colaboraron con instituciones como el Banco de Alimentos de Rosario (BAR), cuya labor es fundamental en la distribución de alimentos a aquellos que más los necesitan. El vínculo de otros estudiantes con esta institución, y su trabajo con un fin social, animaron a plantear esta propia contribución a la causa desde la ingeniería. Cabe destacar que los estudiantes tuvieron contacto con plantas similares de otras universidades.

### 2.1.5 Proyecto "Rediseño integral y optimización de procesos del Centro Regional de Hemoterapia" de los alumnos Arce Mercedes – Monateri Lucila

El proyecto se desarrolló en torno al Centro Regional de Hemoterapia de la Provincia de Santa Fe (CHR), organismo que desempeña un papel crítico en la red pública de salud al encargarse del procesamiento, análisis, fraccionamiento y distribución de hemocomponentes para todos los hospitales públicos provinciales.
A partir de visitas a sus instalaciones y reuniones con sus autoridades, se identificaron diversas problemáticas que afectan su eficiencia y calidad: disposición física inadecuada que genera entrecruzamientos de muestras y tiempos ociosos, ausencia de herramientas visuales de control, y falta de estandarización operativa. Se detectaron también inconvenientes por la falta de automatización. Estas limitaciones generan costos elevados, afectan la trazabilidad y dificultan la mejora continua.
Frente a este diagnóstico, se propuso un proyecto de mejora integral con un tratamiento técnico multidimensional, propio de la Ingeniería Industrial aplicada al sector salud.
El objetivo general consistió en optimizar el flujo de producción, aumentar la eficiencia operativa y reducir los costos del CRH, mediante una reestructuración técnica, espacial y organizativa. Para esto, el enfoque del proyecto se centró en mejoras de bajo costo y alto impacto, priorizando soluciones que optimicen el funcionamiento actual con los recursos disponibles.
Como resultado, gracias al rediseño del lay out se logró reducir en un 57 % la distancia recorrida por el personal y en un 77 % los entrecruzamientos de flujos. A su vez, se proyectó una reducción del 75 % en el tiempo estándar por unidad procesada en caso de que se pueda llevar a cabo una inversión tecnológica.
El proyecto confirma que, incluso en entornos públicos y con recursos acotados, es posible generar transformaciones de alto impacto mediante el uso criterioso de herramientas de diagnóstico, rediseño y gestión. El modelo propuesto es replicable en otros efectores del sistema sanitario provincial. Además de atender problemas operativos inmediatos, contribuye a consolidar al CRH como un referente en eficiencia, orden y calidad dentro del ámbito de la medicina transfusional.

## 3. PERCEPCIÓN DE LOS AUTORES

### 3.1 METODOLOGÍA

El enfoque metodológico adoptado para abordar el desafío propuesto se fundamentó en una perspectiva empírica y exploratoria, ya que se buscó indagar en profundidad las experiencias y percepciones de los participantes a partir de su propia práctica. Para ello, se empleó la investigación-acción, que resulta especialmente pertinente en contextos donde se pretende no solo describir fenómenos, sino también generar aprendizajes y promover mejoras en los procesos analizados.
La recolección de información se llevó a cabo mediante la aplicación de entrevistas semiestructuradas, diseñadas con un carácter flexible, lo que permitió a los entrevistados no solo responder las preguntas propuestas, sino también ampliar sus respuestas y aportar reflexiones adicionales cuando lo

consideraban necesario. Este tipo de instrumento favoreció un diálogo abierto y enriquecedor, donde surgieron matices y perspectivas difíciles de capturar con técnicas más rígidas de investigación (Gainza, 2006; Tamayo y Tamayo, 2004).
En total, participaron doce entrevistados, quienes compartieron sus experiencias y puntos de vista en torno al tema de estudio. Cada uno de ellos respondió un conjunto de siete preguntas abiertas, lo que facilitó la obtención de información variada, profunda y contextualizada. La elección de este tipo de preguntas estuvo orientada a promover la libre expresión de ideas, evitando respuestas cerradas o limitadas, y posibilitando un análisis más integral y cualitativo de los resultados obtenidos.
De esta manera, la metodología empleada no solo permitió acceder a datos relevantes sobre las prácticas desarrolladas, sino también comprender las motivaciones, dificultades, aprendizajes y proyecciones de los autores de los proyectos, aportando así una base sólida para la interpretación y discusión de los hallazgos.

Las preguntas realizadas fueron:

1. ¿Cuál fue la motivación por la cual elegiste la temática del proyecto?
2. ¿Cuáles fueron las mayores dificultades a la hora de realizar el proyecto y cómo las has superado?
3. ¿Cuáles han sido las experiencias más gratificantes al trabajar en el proyecto?
4. ¿Hubo predisposición de las partes interesadas en brindarles información, apoyo, para la realización del proyecto?
5. ¿Les generó algún valor agregado a los conocimientos y habilidades del ingeniero industrial?, de ser así, ¿cuáles fueron?
6. ¿Cuáles fueron las herramientas brindadas por la carrera que más utilizaron durante la ejecución del proyecto?
7. ¿Qué consejos le darías a algún estudiante de la carrera que está evaluando participar en algún proyecto social?

A continuación, se presenta una síntesis de cada una de las preguntas en base a las respuestas de los entrevistados.

**Pregunta 1: Motivación para elegir el proyecto**

Las respuestas reflejan una fuerte motivación por parte de los estudiantes de involucrarse en un proyecto con impacto social tangible, que permitiera aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera en contextos reales y con sentido comunitario. La posibilidad de generar un cambio positivo en la vida de otras personas, especialmente en sectores vulnerables, fue un factor común. Se valoró la oportunidad de implementar soluciones concretas, considerando las restricciones del entorno (económicas, materiales, organizativas), lo que brindó una experiencia más cercana a los desafíos laborales reales. Algunos estudiantes se sintieron especialmente atraídos por la propuesta institucional que les permitía colaborar con organizaciones como el Banco de Alimentos de Rosario, el Centro Regional de Hemoterapia de la Provincia de Santa Fe o con proyectos impulsados desde la Universidad Nacional de Rosario. En todos los casos, el proyecto fue percibido como una oportunidad no solo académica, sino personal y ética. A diferencia de iniciativas orientadas únicamente a la mejora de indicadores empresariales, estos trabajos ofrecían un propósito más profundo: contribuir desde la ingeniería al bienestar social. También se destacó la intención de retribuir a la universidad pública mediante un proyecto útil para la comunidad.

**Pregunta 2: Dificultades enfrentadas**

Las principales dificultades estuvieron relacionadas con la obtención de información técnica precisa y confiable. Muchos encuestados se enfrentaron a la escasez o ausencia total de datos históricos, planos, registros o procesos claramente definidos por parte de las organizaciones. Esta situación generó la necesidad de realizar supuestos, entrevistas, visitas a otras instituciones y de redefinir escenarios durante el desarrollo del proyecto. En otros casos, el desafío fue delimitar el alcance del trabajo ante problemáticas tan amplias como la inseguridad alimentaria. Esto implicó priorizar objetivos, seleccionar públicos específicos y estructurar soluciones viables dentro de las restricciones existentes. Además, algunos equipos notaron resistencias internas dentro de las organizaciones, especialmente por parte de operarios que percibían los cambios como amenazas. La falta de conocimientos previos en ciertas

áreas —como la alimentación animal, los procesos alimenticios industriales, o procesos relacionados con la medicina — también se mencionó como un obstáculo que fue superado mediante consulta a expertos, docentes y profesionales externos. A pesar de las dificultades, los estudiantes lograron avanzar gracias al trabajo colaborativo, la investigación, la flexibilidad metodológica y el apoyo de tutores.

**Pregunta 3: Experiencias gratificantes**

Las experiencias más gratificantes estuvieron ligadas al impacto humano y social del trabajo, al sentimiento de utilidad y a la posibilidad de aplicar conocimientos técnicos en una causa significativa. Muchos estudiantes destacaron el vínculo generado con las organizaciones, los voluntarios y otras personas involucradas, lo que les permitió tener una visión más amplia del ecosistema social en el que operaban. También fue muy valorada la oportunidad de trabajar en equipo, compartir conocimientos, y ver cómo las ideas se transformaban en soluciones aplicables. Para algunos, resultó movilizante observar la magnitud de las redes solidarias y el compromiso de quienes trabajan día a día para asistir a los sectores más necesitados. La sensación de estar aportando a una necesidad concreta, y no solo a un ejercicio académico, les generó un fuerte sentido de pertenencia y responsabilidad. En varios casos, se mencionó la gratificación de sentir que se estaba “devolviendo” algo a la universidad pública o contribuyendo a mejorar condiciones dentro de la misma. El apoyo de tutores y profesionales también fue un factor clave para que la experiencia sea significativa.

**Pregunta 4: Predisposición de las partes interesadas**

En términos generales, los estudiantes percibieron una buena predisposición por parte de los actores involucrados. Destacaron especialmente el compromiso de las comisiones directivas, docentes, universidades asociadas y referentes institucionales que acompañaron el proceso brindando datos, información técnica y orientación. Sin embargo, también surgieron algunos matices: en ciertos casos, los equipos notaron cierta resistencia al cambio por parte de operarios o empleados, lo que dificultó la implementación de algunas ideas o el acceso a procesos internos. Además, hubo dificultades prácticas como la coordinación de agendas con personas clave o la falta de información estructurada que debía obtenerse por otros medios. Pese a ello, los estudiantes reconocieron el valor de las entrevistas, visitas a plantas similares y consultas a profesionales externos como herramientas eficaces para superar esas barreras. En proyectos más específicos, como los vinculados al alimento para animales de laboratorio, hubo limitaciones para obtener datos técnicos sobre maquinaria o consumo energético, aunque se contó con el apoyo de algunas áreas específicas de la universidad.

**Pregunta 5: Valor agregado a la formación**

Todos los encuestados coincidieron en que la experiencia les generó un valor agregado significativo, tanto en el plano técnico como en el humano. En primer lugar, destacaron la posibilidad de integrar múltiples herramientas aprendidas en distintas materias —como diseño de procesos, evaluación económica, logística, higiene y seguridad— en un caso real y complejo. Este ejercicio de aplicación práctica les permitió consolidar aprendizajes, ganar autonomía y adaptarse a contextos inciertos. Además, muchos señalaron que el proyecto les permitió incorporar habilidades nuevas, como la comunicación con actores sociales, la gestión del conflicto, el análisis de problemáticas multidimensionales y la planificación bajo restricciones. También se mencionó el fortalecimiento del trabajo en equipo, el liderazgo compartido y la empatía. Algunos estudiantes destacaron que gracias al proyecto ahora se sienten mejor preparados para emprender, diseñar proyectos desde cero o tomar decisiones integrales. La experiencia también les permitió vivenciar el rol del ingeniero como agente de transformación social, ampliando su mirada sobre la profesión.

**Pregunta 6: Herramientas de la carrera utilizadas**

Las herramientas más utilizadas fueron múltiples y variadas, reflejando la naturaleza integral de los proyectos. Entre las más mencionadas se encuentran el diseño de procesos y layout, la planificación y gestión de la producción, la evaluación de proyectos de inversión, y el análisis de costos. También fueron claves los estudios de mercado, la estimación de demanda y el uso de indicadores de eficiencia. Se aplicaron conceptos de higiene y seguridad industrial, control de calidad, balance de líneas, y planificación de abastecimiento. En algunos casos, se usaron herramientas aprendidas en materias optativas, como Introducción a la Ingeniería de los Alimentos o Introducción a la Ingeniería del

Envasado. La estadística y la formulación de hipótesis también jugaron un rol importante en la validación de resultados y en el análisis de datos relevados. Además, se resaltó el valor de herramientas más transversales como el trabajo colaborativo, la gestión del tiempo, y la toma de decisiones basada en evidencia. Esta variedad de recursos evidencia que los proyectos exigieron un abordaje multidisciplinario y una integración profunda de los aprendizajes adquiridos a lo largo de la carrera.

**Pregunta 7: Consejos para estudiantes**

Las recomendaciones fueron unánimemente positivas. Todos los encuestados alentaron a futuros estudiantes a involucrarse en este tipo de proyectos sin dudarlo. Consideraron que es una experiencia altamente enriquecedora, tanto en el plano profesional como personal. Subrayaron que trabajar en un proyecto con impacto social permite aplicar los conocimientos de forma significativa, desarrollar habilidades nuevas y comprender mejor el rol que puede tener un ingeniero en la transformación de la realidad. También aconsejaron investigar en profundidad la organización con la que se va a trabajar, dialogar activamente con todos los actores involucrados, y mantenerse abiertos a escuchar, aprender y adaptarse. Varios recomendaron asumir el compromiso con responsabilidad, documentar todo el proceso de forma rigurosa y buscar apoyo en docentes, tutores y especialistas. En definitiva, el consejo general fue que se animen a salir de la zona de confort, a comprometerse con causas que trasciendan lo económico, y a confiar en que la ingeniería puede —y debe— estar al servicio de la sociedad.

## 4. CONCLUSIONES.

La experiencia relatada en este trabajo demuestra que los proyectos de índole socioambiental constituyen una valiosa oportunidad pedagógica dentro de la formación en Ingeniería Industrial, generadora de una elevada motivación al momento de aplicar conocimientos y/o investigar nuevas herramientas. A través de la vinculación con organizaciones sociales, los estudiantes no solo logran aplicar herramientas técnicas propias de su disciplina —como el diseño de procesos, la planificación productiva o la evaluación de proyectos—, sino que también se enfrentan a desafíos del mundo real que exigen adaptabilidad, sensibilidad social y capacidad para trabajar con actores diversos.

Lejos de ser una alternativa marginal, estos proyectos se revelan como experiencias profundamente formativas, que permiten resignificar el rol del ingeniero en la sociedad. El contacto con problemáticas sociales concretas, la colaboración interdisciplinaria, y el compromiso con el bienestar colectivo amplían la mirada técnica hacia una perspectiva integral y humanista de la profesión. En este sentido, se desarrollan no solo competencias técnicas, sino también habilidades blandas clave como la comunicación efectiva, el liderazgo colaborativo, la gestión del conflicto y la toma de decisiones bajo incertidumbre.

Asimismo, la motivación intrínseca de los estudiantes, el impacto tangible del trabajo realizado y el reconocimiento del rol transformador de la ingeniería industrial refuerzan la importancia de incluir este tipo de iniciativas en la currícula universitaria. La predisposición de las instituciones y la posibilidad de generar alianzas entre universidad, comunidad y organizaciones sociales refuerzan el valor estratégico de este enfoque.

En definitiva, los proyectos con propósito social y ambiental no solo enriquecen la formación académica, sino que también permiten formar profesionales comprometidos, capaces de contribuir activamente a una sociedad más equitativa, inclusiva y sostenible. Es responsabilidad de las instituciones de educación superior generar y fomentar estos espacios, entendiendo que la ingeniería, cuando se orienta al bien común, se transforma en una poderosa herramienta de cambio social.

## 5. REFERENCIAS.

Gainza, A. (2006). *La entrevista en profundidad individual.* En: Canales, Manuel (editor): Metodologías de investigación social. Introducción a los oficios: 219-263.

López Cerezo, J. A., & Luján, J. L. (2000). *Ciencia, tecnología y sociedad: una introducción al estudio social de la ciencia y la tecnología*. Ediciones Tecnos.

Martín Mateos, I. T. (2023). *Aprendizaje de competencias éticas y sociales en el grado de ingeniería mecánica*. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, 27(2), 75-83. https://doi.org/10.5944/ribim.27.2.42146

Pérez Rave, J. I. (2014). *¿Cómo influye la ingeniería industrial en la sociedad?* Revista EIA, (22), 219-232.

Tamayo y Tamayo, M. (2004). *Diccionario de la investigación científica* (2ª ed.). Limusa. UNESCO. (2017). *Educación para los Objetivos de Desarrollo Sostenible: objetivos de aprendizaje*. París: UNESCO.

Ametller, U; Kyska, I (2024). *Puesta en funcionamiento de la Unidad de Procesamiento de Alimentos para una organización social sin fines de lucro.* Tesis de grado. Ingeniería Industrial, FCEIA UNR. https://sites.google.com/view/proyectoindustrialfceia/biblioteca-de-proyectos?authuser=0

Arce, M.; Monateri, L. (2025). *Rediseño integral y optimización de procesos del Centro Regional de Hemoterapia".* Tesis de grado. Ingeniería Industrial, FCEIA UNR. https://sites.google.com/view/proyectoindustrialfceia/biblioteca-de-proyectos?authuser=0

Banchio, N.; Cabral, M.; Calzia, M., Huber, A. (2024). *Diseño y análisis técnico de una planta pública de elaboración de alimentos, de alto valor nutricional, para garantizar su acceso a sectores vulnerables.* Tesis de grado. Ingeniería Industrial, FCEIA UNR. https://sites.google.com/view/proyectoindustrialfceia/biblioteca-de-proyectos?authuser=0

Del Valle, C; Domenech, J. (2024). *Mejora integral de las operaciones logísticas del depósito del Banco de Alimentos de Rosario.* Tesis de grado. Ingeniería Industrial, FCEIA UNR. https://sites.google.com/view/proyectoindustrialfceia/biblioteca-de-proyectos?authuser=0

Menini, F; Guerzoni, G. (2024)**.** *Análisis de factibilidad técnica, económica y financiera de una planta productora de alimento balanceado para animales de laboratorio.* Tesis de grado. Ingeniería Industrial, FCEIA UNR. https://sites.google.com/view/proyectoindustrialfceia/biblioteca-de-proyectos?authuser=0

# IMPLEMENTACIÓN DE SEGUIMIENTO DE GRADUADOS PARA LA VINCULACIÓN ENTRE UNIVERSIDAD Y MEDIO SOCIOECONÓMICO

Tavella, Demián Andrés – Miropolsky, Ariel – Manera, Roxana

*Facultad Regional Córdoba, Universidad. Tecnológica Nacional*
*demitavella@hotmail.com;*

**RESUMEN**

El presente trabajo desarrolla un proceso de seguimiento de los graduados de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, mediante la elaboración de una encuesta anual de manera digital que reúne toda la información pertinente para el análisis y el seguimiento académico y profesional de los mismos, logrando obtener información que proporciona una visión integral de sus trayectorias pos universitarias.

Para esto se explicará el motivo que impulsa el presente estudio, el cual está vinculado no solo a una cuestión estratégica universitaria, sino también a un concepto de vinculación académica, de por ejemplo las carreras de ingeniería. Además, se procederá a mencionar cada una de las etapas de la metodología haciendo foco en la elección de grupo de muestra y elaboración, de forma de poder establecer una metodología que asegure alcanzar datos fehacientes y confiables, indicando el sustento metodológico científico que lo avala.

Por último, se mostrarán los principales resultados obtenidos en la encuesta desarrollada para el año 2024 cuyos datos ya fueron procesados y analizados obteniendo diferentes conclusiones que sientan las bases para una gestión más efectiva y orientada al desarrollo continuo de la institución educativa.

**Palabras Claves:** Comunidad – Vinculación – Mercado Laboral – Competencias

**ABSTRACT**

This paper develops a process for tracking graduates of the National Technological University, Córdoba Regional Faculty, through the creation of an annual digital survey that gathers all the relevant information for their academic and professional analysis and monitoring, obtaining information that provides a comprehensive view of their post-university trajectories.

To this end, the rationale behind this study will be explained, which is linked not only to a strategic university issue, but also to a concept of academic linkage, for example in engineering degrees. In addition, each stage of the methodology will be mentioned, focusing on the selection of the sample group and its development, in order to establish a methodology that ensures reliable and trustworthy data, indicating the scientific methodological basis that supports it.

Finally, the main results obtained in the survey conducted for the year 2024 will be presented. The data has already been processed and analyzed, yielding various conclusions that lay the foundation for more effective management geared toward the continuous development of the educational institution.

**Keywords:** Community – Connections – Job Market – Skills

## 1. INTRODUCCIÓN

La vinculación, definida como una de las funciones sustantivas de la educación superior, establece el puente crítico entre la universidad y su contexto social y económico. Esta función no se limita a la extensión cultural o a la mera transferencia de conocimientos, sino que busca una conexión activa y bidireccional que responda a las necesidades de la comunidad. En este marco, el seguimiento de egresados se erige como la manifestación más tangible y el mecanismo más efectivo para medir el impacto y la pertinencia social de la labor académica (Troncoso Piedrahíta, Liliana Maria, et al; 2013). Es a través de esta práctica que las instituciones demuestran su responsabilidad social universitaria, redefiniendo su identidad en relación con sus graduados y el entorno.

Históricamente, la relación entre la universidad y la industria operaba a través de un "canal tradicional" unidireccional, donde el conocimiento fluía de la academia a las empresas mediante la contratación de graduados, conferencias y publicaciones (Sarabia-Altamirano, Gabriela; 2016). Sin embargo, la dinámica del mercado global ha forzado una transformación de este modelo. La creciente complejidad de las actividades económicas y la necesidad de profesionales capaces de actualizarse de manera constante han impulsado la evolución hacia un "canal bidireccional"(Ramírez Domínguez, et al; 2017). En este nuevo paradigma, la universidad y las empresas colaboran en la creación conjunta de conocimiento e innovación, con el objetivo de fomentar un desarrollo sostenible a largo plazo (Sarabia-Altamirano, Gabriela; 2016). La metodología de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) es un ejemplo de este enfoque adaptativo, donde el seguimiento de egresados y empleadores no es un ejercicio estático, sino un proceso dinámico de retroalimentación para la mejora continua de los planes de estudio y la oferta de educación continua (Ramírez Domínguez, et al; 2017). Este enfoque multidimensional subraya que las instituciones más exitosas entienden la vinculación no como una obligación, sino como un proceso de adaptación constante a las exigencias del entorno.

Además, las actividades de seguimiento de graduados forman parte de uno de los puntos necesarios para la acreditación de cualquier carrera de grado según lo indicado por el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería República Argentina (CONFEDI), en donde se establece que “la carrera, por sí misma o como parte de una unidad mayor, realiza actividades de seguimiento de graduados y produce información relativa a su inserción profesional para evaluar los procesos de formación” (Elso Morado D. E., 2022). Así, los estudios de seguimiento e impacto de egresados se convierten en un mecanismo para establecer una relación de doble vía entre la institución y los egresados y benefician a todas las partes involucradas, desde las instituciones hasta la comunidad, incluyendo a los egresados y a los profesionales en formación, por cuanto su propósito es contribuir a mejorar la calidad de la educación, a fin de aportar a la solución de problemas (De Becerra, 2008)

En otras palabras, el seguimiento de egresados y estudiantes avanzados genera un valor multidireccional que beneficia a la universidad, a sus graduados y al sector social y empresarial. Este ecosistema de valor compartido es el principal argumento para considerar esta función como una prioridad estratégica.

Existen múltiples casos de éxitos en universidades latinoamericanas quienes han desarrollado modelos variados para el seguimiento de egresados. La Universidad de Guadalajara (UDG) enfoca su programa en la educación continua y el apoyo a la inserción laboral, ofreciendo un servicio de bolsa de trabajo y la promoción de actividades de actualización profesional (Arrogante, Belen; 2025). Por su parte, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) implementa una metodología que segmenta a los egresados en diferentes cohortes (recién graduados y egresados de 3 a 5 años) y realiza encuestas a empleadores a través de reuniones presenciales para obtener información fiable sobre el desempeño laboral (Ramírez Domínguez, et al; 2017). Finalmente, la Universidad de Antioquia en Colombia destaca por su enfoque de integración de los egresados en los procesos de autoevaluación y acreditación de los programas académicos, así como en proyectos de investigación y empresariales (Troncoso Piedrahíta, Liliana Maria, et al; 2013).

A pesar de los beneficios evidentes, se identifican algunos desafíos críticos. Uno de los principales desafíos en los estudios de egresados es la baja tasa de respuesta en las encuestas (Yeves, Jesus et al; 2018). Un estudio reciente en la Universidad de Zaragoza (2025), por ejemplo, obtuvo una tasa de respuesta del 39.5% para egresados de doctorado. Aunque este porcentaje es considerable para encuestas de este tipo, también significa que más del 60% de la población no fue consultada, lo que plantea un problema de validez y representatividad de la muestra.

Otro desafío recurrente es la obsolescencia de los datos de contacto. La Universidad Veracruzana, por ejemplo, ha señalado la dificultad de obtener información profesional actualizada de sus egresados, lo que a menudo requiere contactar directamente con los empleadores para verificar su estatus laboral

(Tansey Jay, 2008). Mantener una base de datos actualizada es un requisito previo para cualquier programa de seguimiento exitoso (Yeves, Jesus et al; 2018).

En consecuencia, es interesante y necesario que las universidades lleven adelante un seguimiento de estos estudiantes que permitan garantizar, que sus carreras, cumplan con los estándares académicos requeridos para mantener y mejorar constantemente la calidad educativa que se ofrece y a su vez ofrecer al medio socio productivo lo que demanda. En esta línea, resulta inevitable desarrollar una herramienta que logre evaluar la experiencia académica y profesional de los egresados, pero también permita enfrentar y superar las limitaciones antes descriptas, identificando áreas de mejora y asegurando que las ofertas educativas estén alineadas con las demandas del mercado y las necesidades de la sociedad.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada busca en primera instancia cumplir con unos de los criterio de evaluación establecidos por el CONFEDI (Elso Morado D. E., 2022) (Elso Morado D. E., 2023) (Consejo Federal de Decanos de República Argentina, 2018) a saber: "*Si la carrera cuenta con un sistema de seguimiento del desempeño de los graduados indicar la inserción de los graduados en el campo laboral, la proporción de graduados que continúan su formación luego de su titulación, el grado de incorporación de los graduados a las actividades docentes universitarias y la proporción de graduados que acceden a cargos de dirección superior o de alta responsabilidad*"

Para esto, y como resultado final, se propone diseñar una encuesta anual de manera digital, que reúne toda la información pertinente para el análisis y el seguimiento académico y profesional de los graduados universitarios.

Si bien el diseño de la herramienta es importante, la misma forma parte de una serie de elementos necesarios a definir, para que los resultados obtenidos sean fehacientes, y la información pueda ser utilizada para diseñar/adaptar los programas de formación actuales que brinda la universidad.

En base a lo anterior, es que se definió la siguiente metodología de trabajo a aplicar todos los años:

- ETAPA 1: Obtención de base de datos y alcance
- ETAPA 2: Definición de tamaño de la muestra objetivo
- ETAPA 3: Diseño de encuesta
- ETAPA 4: Proceso de planificación y ejecución de la tarea
- ETAPA 5: Proceso de seguimiento y control

### 2.1. Obtención de base de datos y alcance

En primer lugar, se definió el universo a analizar, el cual está compuesto por todos los graduados, de diferentes carreras de grado, posgrado, licenciaturas y tecnicaturas de la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional. Desde el sistema académico de la Facultad, se extraen las bases de datos que contienen información personal, en formato Excel.

Si bien esta base (Secretaría Académica Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba, 2024) posee información histórica de egresados, a modo de poder acotar el universo y englobar a un conjunto de población mayoritariamente activa es que se decide tomar información de los egresados desde 1990 hasta 2023.

Esto da un total de 19144 egresados de todas las ofertas académica de la Facultad.

En este punto, hay que destacar que para los sucesivos años las bases de datos irán ampliándose y/o actualizándose según lo que se considere.

### 2.2. Definición de tamaño de la muestra objetivo

Teniendo en cuenta que es prácticamente imposible encuestar a todo el universo, es que debe definirse un número de consultados que resulten representativos para el estudio.

Para ello se utilizó el concepto de muestra, que se entiende como la parte o fracción representativa del conjunto de una población que ha sido obtenida con el fin de investigar ciertas características del universo. Se espera, que lo que se averigüe en la muestra sea representativo del conjunto, lo cual depende en gran medida de la forma en que sea confeccionada la misma (Oliver, 2011)

Para calcular un tamaño de muestra representativo se siguieron los principios del muestreo estratificado en poblaciones finitas (Berenson, Levine, & Krehbiel, 2006) (Fernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014) :

$$n_0 = \frac{Z^2 p(1-p)}{e^2} \quad (1)$$

Donde:

En la que $n_0$ es el tamaño de la muestra sin considerar el factor de corrección de población finita, p es la porción verdadera de éxito, es decir, el parámetro de población, que en este caso se considera con un valor de 0,5 (valor establecido en forma constate). Z es el nivel de confianza deseado que fue establecido en un 95% (valor estándar para este tipo de estudios), que equivale a un valor de 1,96 y e es el error de muestreo permitido, que en nuestro caso es del 5%, es decir de 0,5.

Aplicando (1), se calculó un valor para $n_0$ = 665,64. Posteriormente se calculó el tamaño de la muestra real, mediante (2), aplicando el factor de corrección.

$$n = \frac{n_0.N}{n_0+(N-1)} \quad (2)$$

Donde N es el tamaño de la población, es decir, los 19144 egresados en el período analizado de 1990 a 2023, y n es finalmente el tamaño de muestra real y representativa a utilizar en este trabajo, con un valor de n = 665,64. En otras palabras, se define que el valor objetivo mínimo de respuestas debe ser de por lo menos 665 para hablar de una muestra cuyos resultados dan un 95% de confianza, con un margen de error del 5%.

Por su puesto, que hay que rescatar que este valor irá actualizándose según lo establecido en el punto precedente relacionado al universo de estudio. Es decir, al cambiar el N (el universo) el cálculo deberá actualizarse.

### 2.3. Diseño de la encuesta

La encuesta abarca varios aspectos como son, datos personales, datos laborales, necesidades de formación y vinculación con la universidad.

La encuesta comienza con datos personales del entrevistado. Después se pregunta sobre su actividad laboral, si trabaja, de qué, en qué rubro, qué puesto y cuánto tiempo. Acá también se intenta encontrar si la actividad que realiza está relacionada con la carrera que estudió.

En otra instancia, se pregunta si ha realizado estudios post universitarios, o en qué áreas temáticas le gustaría formarse, ya que, desde la misma Facultad, se ofrecen formaciones para dichas personas.

Por último, para generar un vínculo que perdure, se consulta de qué manera le interesaría participar en la Universidad, o si es que no tiene ningún interés.

Toda esta información se carga en un formulario de Google Forms, el cual genera un link que se compartirá en el paso de ejecución de la tarea.

A continuación, se detalla la encuesta elaborada:

*Datos personales:*

DNI:

Correo:

Provincia de nacimiento:

País de residencia.

*Datos laborales*

¿Actualmente está empleado o lleva a cabo alguna actividad laboral? (Opciones disponibles: Si/ No)

¿Tienes más de un trabajo? (Opciones disponibles: Si/ No). En caso que responda Si, complete las veces que sea necesario el resto de las peguntas de datos laborales, en caso que responda que No, pasa a la pregunta sobre la “Jubilación” y “Trabajos de hogar”.

*Descripción de la Actividad laboral:*

¿Dónde trabaja actualmente? (nombre de la empresa, institución o descripción de su actividad independiente):

Tipo: (Pudiendo elegir entre empresa, organización, institución, fundación u otros)

Tamaño: (Pudiendo elegir entre emprendimiento, PyMEs, gran empresa o no aplica)

Rubro de la empresa: (según un listado definido)

Sector (Pudiendo elegir entre público/ privado)

Relación de Trabajo (Pudiendo elegir entre relación de dependencia, independiente, propietario o emprendedor)

La organización donde trabaja es (Pudiendo elegir entre nacional o extranjera)

Modalidad de trabajo: (Pudiendo elegir entre teletrabajo, presencial o híbrido)

Cargo o Posición Actual: (Pudiendo elegir entre empleado, jefe, gerente, director, presidente, propietario u otro)

Jornada laboral: (Pudiendo elegir entre full time/ part time / ocasional)

¿Trabaja para la misma ciudad/país en la que vive?

Describe brevemente tu Actividad laboral:

¿Consideras que la carrera que estudiaste en la UTN, te dio los conocimientos necesarios para la inserción laboral?

*Jubilación*

¿Son Jubilado? (Pudiendo elegir, Si /No) En caso de elegir qué No pasa a la sección de trabajos de hogar

*Trabajos de hogar*

¿Trabajas en tareas del hogar? (cuidado de la casa/hijos/otros) (Pudiendo elegir, Si /No)

*Formación*

¿Realizaste estudios extras luego de graduarte de la universidad? (Pudiendo elegir, Si /No)

Si tu respuesta fue Si, ¿Cuál?

¿Cuál es tu nivel de inglés? (Pudiendo elegir cero, básico, intermedio, avanzado, bilingüe/nativo)

¿En qué temáticas te interesaría realizar una formación?

¿De qué manera te interesaría participar en la UTN? (Opciones posibles en proyectos profesionales de desarrollo productivo o servicios, proyectos educativos con fines sociales, ser docente universitario en carreras de grado, ser docente para el dictado de formaciones (cursos, proyectos, etc.), recibir información de actividades (eventos, congresos, oferta académica) o Ninguna)

¿A través de qué medio accediste a la encuesta?

### 2.4. Procesamiento, seguimiento y control

Para poder llevar adelante el proceso, se realizó el envío de las encuestas en forma masiva según un sistema de “mailing” predefinido por la universidad.

Luego de haber enviado los correos electrónicos con el link de acceso a la encuesta, comenzaron a llegar las respuestas a través del formulario de Google Form.

El objetivo fue que el equipo destinado al trabajo, fuera realizando un análisis del volumen de respuestas examinando, por ejemplo qué carrera corresponde, que grupo de edad está contestando, desde que punto geográfico están respondiendo, entre otras cosas.

## 3. RESULTADOS

En cuanto a los resultados obtenidos, en total se obtuvieron para la encuesta del 2024, 1847 respuestas que superaron ampliamente el tamaño de muestra establecido, pudiendo determinar la validez de los resultados, ya que manteniendo el nivel de confianza en el 95%, el margen de error se redujo a tan solo el 2,17 %.

### 3.1. Datos personales

En los gráficos subsecuentes se analizaron los datos personales de los encuestados, tales como su lugar de residencia actual, provincia de nacimiento y ciudad de residencia. Se hace especial énfasis en la distribución geográfica de los egresados en Córdoba, dado que la Facultad Regional de la UTN analizada, se encuentra en esta provincia.

Esta información resulta fundamental para identificar si los egresados tienden a permanecer en su lugar de origen o migran a otras regiones, lo que ofrece una perspectiva sobre su movilidad profesional y académica, tanto dentro como fuera de la provincia.

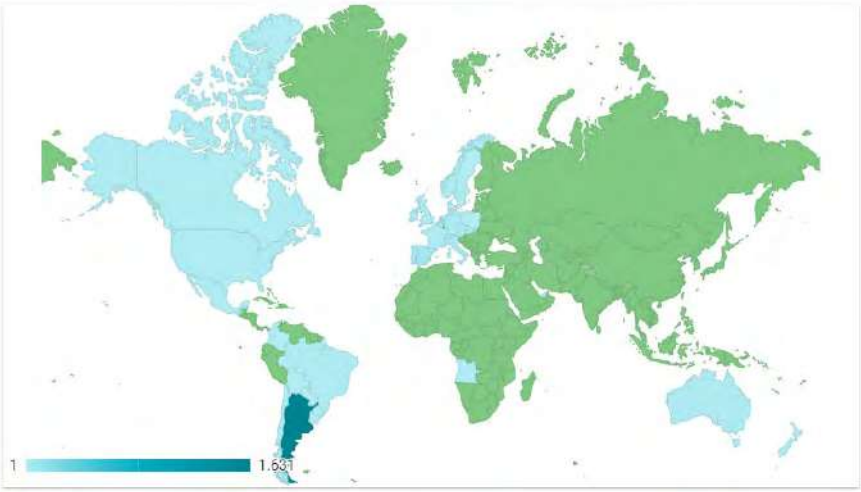



*Figura 1 Ubicación geográfica de los egresados*

En la figura 1 se evidencia una clara concentración geográfica de los egresados de ingeniería en, Argentina. Numéricamente de los 1847 encuestados, 1.631 residen en el país, y de estos, 1.390 se encuentran en dicha provincia, lo que representa un 75,3%.

Además, se destaca que, aunque el 88,3% de los egresados continúa viviendo en Argentina, la mayoría opta por quedarse en Córdoba, subrayando la importancia de la provincia como núcleo profesional y académico para los egresados de esta carrera.

Siguiendo con el análisis, de los 1.390 egresados que actualmente residen en la provincia de Córdoba, un 98,6% (equivalente a 1.370 graduados) nació en esta misma provincia. Este dato, sugiere una fuerte tendencia de los egresados locales a continuar viviendo y desarrollando sus carreras profesionales en su lugar de origen.

#### 3.1.1 Vinculación de egresados con la Universidad

En la pregunta vinculada a la forma de vinculación con la universidad, en donde los encuestados podían elegir más de una opción, se destaca que la mayoría de los egresados (el 50% de la muestra) prefiere mantener su vínculo con la universidad mediante la participación en congresos y aprovechando la oferta académica que la facultad les ofrece. En segundo lugar, muchos eligen la docencia como forma de seguir conectados con la institución. El resto de las preferencias se distribuye de manera equitativa entre proyectos profesionales y educativos, lo que refleja el interés de los egresados en continuar creciendo tanto en el ámbito académico como en el profesional, manteniendo un lazo activo con la universidad. Por último, se destaca que aproximadamente un 12% de los encuestados no desea mantener una relación con la universidad.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para este punto:

*Tabla 1 Forma de vinculación con la universidad*

| Participación | Cantidad Interesados |
|---|---|
| Congresos y oferta académica | 924 |
| Docencia | 791 |
| Proyectos Profesionales | 416 |
| Proyectos educativos | 416 |
| Ninguna | 220 |

### 3.2. Datos laborales

Los gráficos que se exhiben a continuación exploran la situación laboral de los egresados, incluyendo su nivel de empleo, cantidad de trabajos, relación laboral y modalidad de trabajo.

Esta información es crucial para evaluar la inserción laboral de los egresados y determinar en qué medida sus estudios en la UTN han influido en su desarrollo profesional. Además, se analiza el sector en el que trabajan, el tamaño de las empresas donde se desempeñan y la naturaleza de su relación laboral, lo que ofrece una visión completa de las oportunidades laborales disponibles para los egresados.

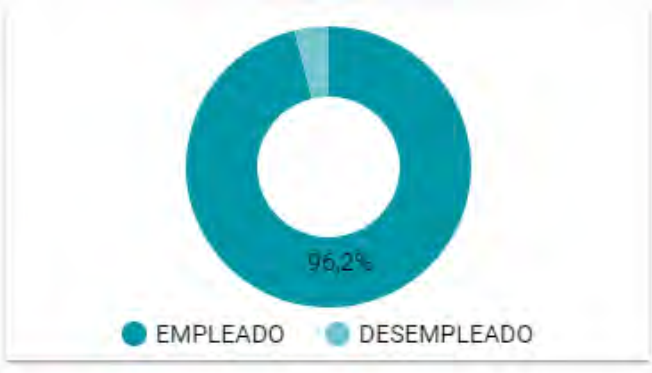



*Figura 2 Nivel de empleo*

Para comenzar, el gráfico 2 revela que el 96,2% de los encuestados están empleados. De este porcentaje, el gráfico 3 indica que el 28,2% tiene más de un empleo. Además, se desprende que de ese 28,2% que cuenta con dos trabajos, el 87,9% reside en Argentina

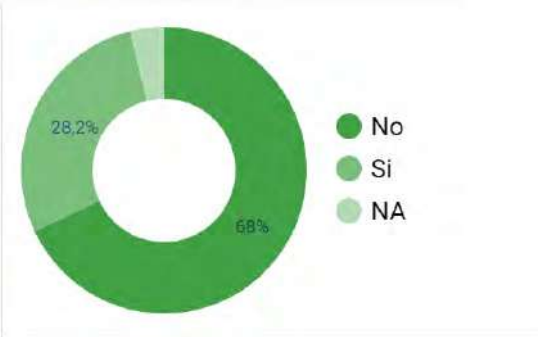



*Figura 3 Respuesta a pregunta ¿Tenes más de un empleo?*

### 3.2.1 Datos laborales desglosados

En los gráficos que se presentan a continuación, se analizan en detalle las respuestas de los egresados en relación con su situación laboral, diferenciando entre aquellos que tienen un solo empleo y aquellos que poseen dos trabajos.

Respecto de la pregunta sobre si la carrera estudiada en la UTN proporcionó los conocimientos necesarios para la inserción laboral, los datos sugieren una diferencia en la satisfacción según el número de empleos.

Al comparar las respuestas, se concluye que los egresados con un segundo trabajo tienden a expresar una mayor satisfacción con la formación recibida y su impacto en la inserción laboral. Específicamente, el gráfico 4 (correspondiente a dos trabajos) indica que la mayoría de estos egresados considera que sus estudios tuvieron un impacto muy positivo en la obtención de empleo. En contraste, en el mismo gráfico 4 (correspondiente a un trabajo) se muestra que los egresados con un solo trabajo manifiestan una satisfacción más neutral respecto a la utilidad de sus estudios.

El dato más importante es el obtenido en el resultado de “nada” pues realmente no es representativo, en el caso de aquellos que tienen un solo trabajo representa un 3% de las respuestas mientras que en los que tienen dos trabajos tan solo un 2%.




*Figura 4 Utilidad de conocimientos bridados por la carrera (a la izquierda aquellos que tienen un solo trabajo y a la derecha aquellos que tiene más de uno)*

Al comparar los gráficos de un solo trabajo versus dos, se observa que tanto para los egresados con un solo trabajo como para los que tienen dos empleos, la modalidad presencial es la más preferida, seguida por la modalidad híbrida. Sin embargo, se destaca que los egresados con un solo trabajo tienden a preferir más la modalidad virtual en comparación con aquellos que tienen dos empleos.

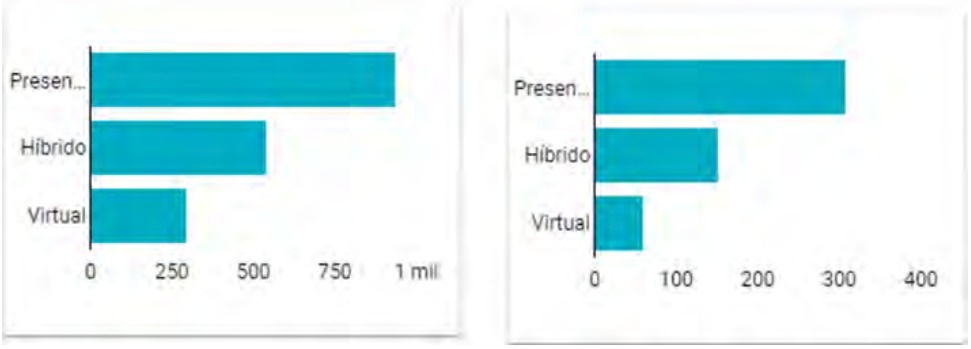



*Figura 5 Modalidad de trabajo (a la izquierda aquellos que tienen un solo trabajo y a la derecha aquellos que tiene más de uno)*

Continuando con el análisis, se detalla una clara tendencia que la mayoría de los egresados ocupa el puesto de analista y empleados. Específicamente, el 52,75% de los egresados con un solo trabajo tienen puesto de analistas o empleados, mientras que el 42,5% de los que tienen dos empleos también están en la misma posición.

Esto podría explicarse ya que es lógico y normal que los puestos de los niveles más bajos de la pirámide, son los mayoritarios en todas las organizaciones, aunque cabe destacar el poco porcentaje de jefes y gerentes, lo que puede llegar a plantear un interrogante en cuanto a la formación realizada para alcanzar estos puestos.

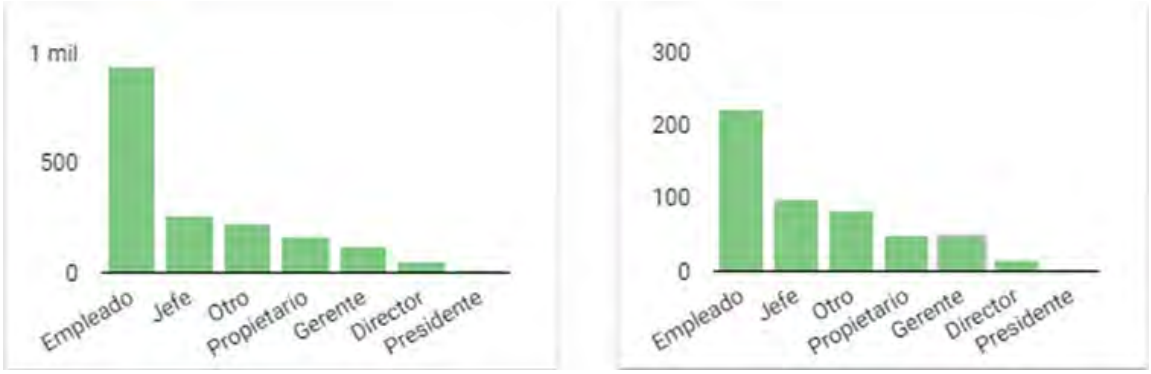



*Figura 6 Cargo/posición actual (a la izquierda aquellos que tienen un solo trabajo y a la derecha aquellos que tiene más de uno)*

En cuanto a la jornada laboral, en ambos grupos la mayoría prefiere una jornada full time, seguida por las jornadas part time, siendo el siguiente gráfico el que representa los resultados obtenidos




*Figura 7 Jornada laboral (a la izquierda aquellos que tienen un solo trabajo y a la derecha aquellos que tiene más de uno)*

Por otra parte, se evidencia una clara tendencia hacia el trabajo en grandes empresas, seguidas por las pequeñas y medianas empresas (PYMEs), mientras que los emprendimientos presentan una participación relativamente baja. La baja participación en emprendimientos podría indicar una menor inclinación hacia el autoempleo o la búsqueda de nuevas iniciativas empresariales en comparación con el empleo tradicional en el sector corporativo.

Además, de las conclusiones derivadas del análisis de los resultados respecto a la relación laboral, se observa que solo una minoría de los egresados es propietario (aproximadamente un 6%) o se considera emprendedor (aproximadamente un 3%) seguido por la opción “trabaja de forma independiente” (un 17% de los resultados). Esto muestra la clara preferencia de los egresados a obtener trabajos en relación de dependencia (representado por un 74% de los graduados).

Por último, la encuesta también revela que más del 50% de los egresados, independientemente de si tienen uno o varios trabajos, se dedican al sector privado, aumentando el valor de público para el segundo empleo producto a lo explicado anteriormente de la cantidad de profesionales que ejercen la docencia universitaria.

### 3.2. Formación

A continuación, se presentan los resultados relacionados con la formación académica adicional de los egresados. Estos gráficos muestran cuántos de los encuestados realizaron estudios posteriores a su graduación, el tipo de formaciones cursadas y detallando en ellas el nivel de inglés adquirido.

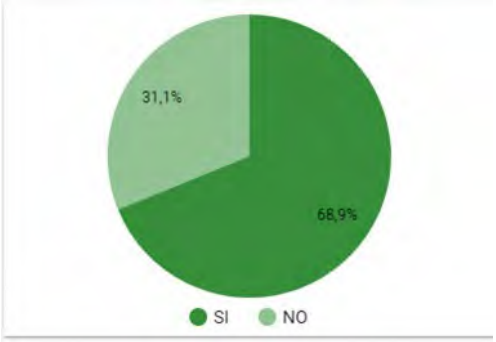



*Figura 8 Estudios posteriores*

Se observa que la mayoría de los egresados (68,9%) realizó un estudio posterior que se cuantifican en la siguiente figura:

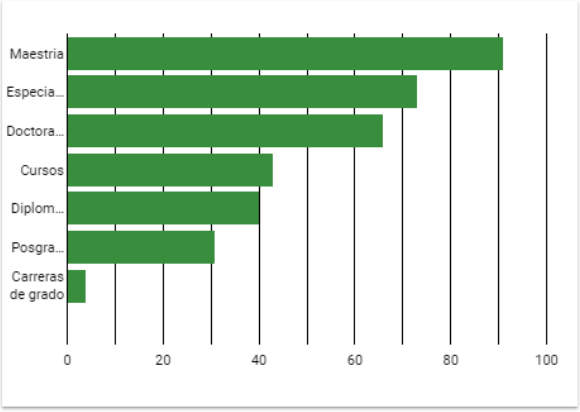



*Figura 9 Cuantificación de los estudios posteriores*

El gráfico destaca que, entre los estudios realizados posteriormente, el mayor porcentaje corresponde a maestrías y especializaciones.

Un aspecto interesante es poder vincular el gráfico anterior con el que hablaba sobre la importancia de los conocimientos aprendidos en la carrera en el ambiente laboral. Al relacionar, se deduce que los egresados que realizaron estudios adicionales después de recibirse, el 93% considera que los conocimientos adquiridos durante la carrera fueron muy o suficientemente útiles para su inserción en el mercado laboral, es decir que la realización de estudios posteriores no está vinculada a que los egresados sientan que le falto alguna formación durante el transcurso de su carrera.

Referido al nivel de inglés se obtuvieron los siguientes resultados:

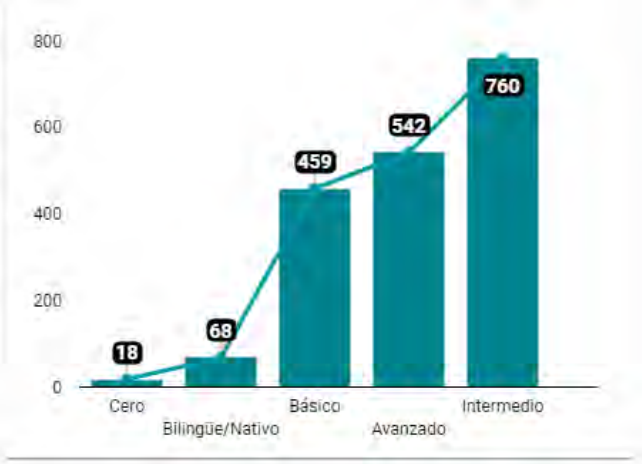



*Figura 10 Nivel de ingles*

Se destaca que, más de la mitad de los egresados ya posee un nivel intermedio o avanzado de inglés, y posiblemente por esta razón casi ningún encuestado solicitó cursos de idiomas como formación adicional. En su lugar, las áreas técnicas como la gestión de proyectos, programación y la inteligencia artificial parecen tener mayor demanda. Esto sugiere que los egresados perciben el inglés como una competencia ya adquirida, y prefieren enfocarse en mejorar habilidades especializadas en el ámbito tecnológico y de gestión

## 4. CONCLUSIONES.

En conclusión, la implementación de una herramienta para el seguimiento de graduados ha proporcionara una visión integral de sus trayectorias pos universitarias y su vinculación con el medio socio productivo.

El análisis de los datos recopilados a través de la encuesta a egresados de la UTN revela varias tendencias y hallazgos significativos. En primer lugar, una gran parte de los egresados reside en la provincia de Córdoba, Argentina, con un 75.3% que continúa viviendo allí, y un 98.6% de ellos que nació en esta región. Esto subraya la importancia de Córdoba como un núcleo académico y profesional para los egresados para UTN FRC.

En cuanto a la inserción laboral, la mayoría de los egresados está empleada en el país, con un 52.75% que trabaja en relación de dependencia, especialmente en grandes empresas. Sin embargo, la proporción de egresados que trabaja de forma independiente o en emprendimientos es notablemente baja, lo que podría indicar una mayor tendencia por empleos estables en estructuras corporativas. Además, se destaca que los egresados con formación adicional (maestrías o especializaciones principalmente) tienden a tener empleos más estables y formales.

Se observa también que, de los egresados que no realizaron estudios adicionales, un 24% no trabaja en relación de dependencia, mientras que entre los que si cursaron estudios adicionales (68,9%), solo el 29% no trabaja en relación de dependencia. Por otro lado, aquellos que realizaron estudios adicionales muestran una mayor satisfacción con la formación recibida en la UTN, con un 93% que considera que los conocimientos adquiridos fueron útiles para su inserción laboral.

En cuanto a la modalidad de trabajo, 838 egresados trabajan en modalidad híbrida o virtual, y un 51% de ellos prefiere participar en congresos y actividades académicas, lo que demuestra un interés por mantener un vínculo activo con la universidad a través de eventos que podrían ofrecer opciones virtuales. Este patrón refuerza la idea de que la flexibilidad en la forma de participación es crucial para aquellos que trabajan de manera no presencial.

Por otra parte, los egresados con un nivel avanzado o nativo de inglés parecen estar mejor posicionados en grandes empresas, con un 56.5% de ellos trabajando en este tipo de organizaciones, lo que sugiere que el dominio del inglés es un factor clave para acceder a oportunidades en empresas que operan en mercados internacionales. Sin embargo, un 43.5% de los egresados con un buen nivel de inglés también se desempeña en PYMEs o emprendimientos, lo que muestra que el idioma sigue siendo una habilidad valiosa, independientemente del tamaño de la organización.

Se puede decir que todos estos hallazgos permitirán identificar áreas de mejora, adaptando la oferta académica a las necesidades del mercado laboral y fortaleciendo la conexión entre la Universidad y sus egresados.

Además, la utilización de una herramienta digital permite en forma implícita la digitalización de la base de datos y fácil acceso a la información en caso de necesidad.

Se sugiere mantener la metodología e ir mejorándola a medida que vayan pasando los años de manera de obtener series históricas que permitirán complejizar el análisis.

## 5. REFERENCIAS

Arrogante, B. (2025). *La importancia de Alumni en las Universidades* . Obtenido de UPV Innovación: https://innovacion.upv.es/es/la-importancia-de-alumni-en-las-universidades/

Berenson, M., Levine, D., & Krehbiel, T. (2006). *Estadística para administración.* México: Pearson Education Latinoamérica.

Consejo Federal de Decanos de República Argentina. (2018). *Propuestas de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de Ingeniería de la República Argentina "Libro Rojo de CONFEDI".* Obtenido de Universidad FASTA: https://confedi.org.ar/download/documentos_confedi/LIBRO-ROJO-DE-CONFEDI-Estandares-de-Segunda-Generacion-para-Ingenieria-2018-VFPublicada.pdf

De Becerra, G. M. (2008). *Seguimiento a egresados. Su impotancia para las instituciones de eduación superior.* Obtenido de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3701001

Elso Morado, D. E. (2022). *Guía Básica para diseño de planes de estudio considerando normas nacionales y ARCUSUR.* Obtenido de CONFEDI: https://confedi.org.ar/wp-content/uploads/2022/05/CONFEDI-Preparacion-frente-al-proceso-de-acreditacion.pdf

Elso Morado, D. E. (2023). *Acreditación Guía Autoevaluación Ingeniería.* Obtenido de CONFEDI: https://confedi.org.ar/download/Acreditacion-Guia-Autoevaluacion-Ingenieria-3ra-Jornada.pdf

Fernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. P. (2014). *Metodología de la Investigación.* México: McGraw Hill.

Oliver, S. P. (2011). *Metodología de la investigación Social.* Madrid: Dykinson SL.

Ramirez Domínguez, e. a. (2017). *Metodología de seguimiento de egresados para fortalecer la vinculación de la universidad con la sociedad*. Obtenido de http://www.theibfr2.com/RePEc/ibf/rgnego/rgn-v5n3-2017/RGN-V5N3-2017-8.pdf

Sarabia-Altamirano, G. (2016). *La vinculación universidad-empresa y sus canales de interacción desde la perspectiva académica, de la empresa y de las políticas públicas*. Obtenido de Scielo: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582016000100013

Secretaría Académica Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba. (2024). *Base de datos graduados.*

Tansey, J. (2008). *Tracking Alumni: Strategies for Collecting and Updating Personal and Professional Information*. Obtenido de https://www.etsu.edu/125-chapter-1/documents/tracking-alumni.pdf

Troncoso Piedrahita, L. M. (2013). *Estado actual de la pácticas con egresados de las unidades académicas de la univerisidad de Antioquia*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-27602013000200005

Yeves, J. e. (2018). *Características y desafios de los estudios de seguimiento de egresados(as) y titulados (as) de la educación superior*. Obtenido de MIDE UC: https://mideuc.cl/wp-content/uploads/2022/11/APUNTES-MIDE-UC_5_Estudios-egresados.pdf

# ANÁLISIS CAUSAL DEL APRENDIZAJE SITUADO Y BASADO EN PROBLEMAS EN INVESTIGACIÓN OPERATIVA: UNA PRIMERA APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

Pascal, Guadalupe

*Facultad de Ingeniería.*

*Universidad Nacional de Lomas de Zamora*

**RESUMEN**

La enseñanza de la Investigación Operativa (IO) destaca por su carácter transversal y aplicabilidad en múltiples disciplinas, abarcando desde la ingeniería hasta la gestión, la ciencia de datos y la inteligencia artificial. Su abordaje actual requiere modelar situaciones complejas, seleccionar métodos adecuados y aplicar soluciones computacionales, todo ello mediado por alfabetización digital, lenguajes de programación y metodologías activas y colaborativas, adaptadas a entornos híbridos.

En la educación superior, la integración de tecnologías digitales y el avance de la inteligencia artificial imponen una transformación pedagógica que redefine contenidos y estrategias. Este trabajo presenta una propuesta didáctica basada en la formación por competencias, articulando el aprendizaje basado en problemas (ABP) y la teoría del aprendizaje situado (SLT), lo que posibilita experiencias educativas contextualizadas y significativas.

En una etapa inicial, se realiza un análisis de descubrimiento causal para identificar los factores que inciden en el desarrollo de competencias en un curso de Ingeniería con enfoque ABP. Se sistematizan datos de cuatro instrumentos: sondeo inicial, calificaciones por unidad temática, rúbrica de evaluación por competencias y cuestionario de retroalimentación sobre más de 250 registros. Posteriormente, se proyecta complementar con técnicas de deep learning y de inteligencia artificial para modelar relaciones de inferencia causal y reorientar el rediseño pedagógico.

**Palabras Claves:** Análisis causal, Aprendizaje basado en problemas (ABP), Aprendizaje situado (ST), Competencias, Investigación Operativa (IO)

**ABSTRACT**

The teaching of Operations Research (OR) stands out for its interdisciplinary nature and its applicability to multiple disciplines, including engineering, management, data science, and artificial intelligence. Its contemporary approach involves modeling complex situations, selecting appropriate methods, and critically applying computational solutions, all mediated by solid digital literacy, mastery of programming languages, and the use of active and collaborative methodologies adapted to hybrid and multimodal environments.

In the context of higher education, the integration of digital technologies and the advancement of artificial intelligence require a pedagogical transformation that redefines content, teaching strategies, and assessment criteria. This paper presents a didactic proposal based on the competency-based approach, which articulates problem-based learning (PBL) and situated learning theory (SLT), to generate contextualized and meaningful educational experiences.

In the first stage, a causal discovery analysis is conducted to identify the factors that influence the development of competencies in an engineering course structured using the PBL and SLT approaches. To this end, data from four instruments are systematized: an initial survey, grades by thematic unit, a competency-based assessment rubric, and a feedback questionnaire, covering more than 250 records. In future stages, this analysis is planned to be complemented by deep learning and artificial intelligence techniques, to model causal inference relationships and guide evidence-based pedagogical redesign.

**Keywords:** Causal analysis, Problem-based learning (PBL), Situated learning (SL), Skills, Operations research (OR)

## 1. INTRODUCCIÓN

La educación superior en las disciplinas STEM atraviesa un proceso de transformación sustantiva en sus fundamentos pedagógicos, impulsado por la convergencia de la digitalización, los avances en inteligencia artificial y la creciente demanda de competencias profesionales complejas, transferibles y contextualizadas. Esta transformación exige no solo la incorporación de nuevas tecnologías, sino también una reformulación crítica de las estrategias de enseñanza y evaluación, orientadas hacia modelos centrados en el desarrollo integral del estudiantado y el aprendizaje significativo situado. (Montenegro-Rueda et al., 2021; Ouyang et al., 2023; Wang et al., 2024)

En este marco, el presente trabajo se focaliza en la evaluación del impacto de estrategias pedagógicas basadas en el aprendizaje situado y el aprendizaje basado en problemas, implementadas en cursos de Investigación Operativa, sobre la base de la literatura reciente en la que destaca se la importancia de combinar diferentes instrumentos para fomentar aprendizajes significativos y sostenibles en carreras STEM (Qi et al., 2024; Tembrevilla et al., 2024)

Para ello, se utilizará un enfoque observacional riguroso, orientado al análisis causal en contextos educativos reales, en los que no es posible aplicar diseños experimentales clásicos. Este tipo de enfoque ha sido utilizado exitosamente en investigaciones históricas y recientes centradas en la estimación de efectos pedagógicos complejos, como los realizados por (Friedrich & Friede, 2020; J. M. Robins et al., 2000) en medicina y por (Martínez-Abad & León, 2023; Tadayon & Pottie, 2021) en educación. Su adopción en este estudio busca ofrecer estimaciones causales transparentes y defendibles, que contribuyan al diseño y evaluación de prácticas pedagógicas basadas en evidencia.

### 1.1. Objetivos y alcance

Las preguntas de investigación que guían el estudio son:

- *¿Qué efecto tienen ciertas competencias técnico-actitudinales sobre el desempeño académico?*
- *¿Qué efecto tienen estrategias pedagógicas implementadas en la autopercepción del conocimiento?*

El objetivo general de la investigación consiste en desarrollar un marco metodológico de análisis causal observacional que permita comprender y predecir la relación causal entre el desarrollo de competencias técnico-actitudinales y otras estratégicas, sobre el rendimiento académico, considerando la influencia de factores individuales y contextuales, significativas en los modelos pedagógicos centrados en la formación de competencias, la resolución de problemas y situaciones reales.

A partir de ello, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar los instrumentos didácticos del modelo pedagógico.
2. Diseñar la metodología de análisis causal.
3. Recolectar los datos y construir un conjunto válido para el análisis.
4. Implementar el análisis para estimar el efecto causal del modelo pedagógico.
5. Obtener conclusiones sobre los modelos pedagógicos implementados.

A los fines del presente trabajo, se presentarán los resultados pertinentes para los primeros tres objetivos. Se consolidará el diseño metodológico adecuado y se presentarán los primeros resultados asociados a la selección del modelo teórico de referencia de la intervención, su implementación, la recolección de datos y la construcción y validación del conjunto de datos observacionales como etapa fundamental en los análisis de causalidad.

## 2. MARCO DE TRABAJO

La presente investigación se inscribe dentro del paradigma observacional con enfoque de análisis causal, orientado a modelar el impacto de determinadas competencias y estrategias pedagógicas sobre el desempeño académico y la autoeficacia percibida en un curso universitario desarrollado en el marco del aprendizaje basado en problemas y el aprendizaje situado.

Durante las últimas décadas, el análisis causal ha emergido como una herramienta metodológica indispensable en el campo de la investigación educativa, al permitir abordar relaciones estructurales

complejas entre variables más allá de los límites de la correlación (Jyothi & Dulhare, 2025). A diferencia de los enfoques meramente descriptivos o correlacionales, los métodos causales permiten generar afirmaciones sobre mecanismos subyacentes que explican cómo y por qué ciertos factores inciden sobre variables independientes, aún en los contextos no experimentales tan frecuentes en las ciencias sociales. (Antonakis et al., 2010) Por ejemplo, (Mosia et al., 2025) explora el impacto de la competencia matemática y el contexto institucional en el rendimiento estudiantil mediante modelado bayesiano, mientras que (Cheng, 2023) aplican estrategias para medir el efecto de la autoeficacia. Por su parte, (Eberhardt et al., 2025) muestran cómo técnicas basadas en grafos cíclicos y técnicas de optimización también son validas para validar instrumentos que permitan realizar estudios causales con variables de comportamiento universitario.

Las secciones siguientes han sido estructuradas en dos componentes principales del análisis causal: el descubrimiento de estructuras causales y la inferencia causal. Esta división responde a una distinción epistemológica y metodológica clave. Por un lado, el descubrimiento causal exploratorio permite identificar posibles relaciones de dependencia entre variables a partir de datos observacionales, sin imponer una estructura teórica previa. Por otro lado, la inferencia causal se basa en marcos formales como el de resultados potenciales para estimar efectos causales específicos, asumiendo ciertos supuestos de identificación. (Glymour et al., 2019; Huber, 2024; Peters et al., 2017; Triantafillou et al., 2010)

### 2.1. Descubrimiento de estructuras causales en contextos educativos

El descubrimiento de estructuras constituye una etapa indispensable en estudios observacionales, especialmente cuando se busca modelar fenómenos educativos complejos en los que no es posible controlar experimentalmente la asignación de condiciones pero se precisa explorar el impacto en el rendimiento académico. (Jyothi & Dulhare, 2025) En lugar de partir de modelos predeterminados, esta fase permite inferir, a partir de los datos disponibles, posibles estructuras causales que guiarán las decisiones metodológicas posteriores. Generalmente, dicha tarea se aborda mediante el aprendizaje de grafos dirigidos acíclicos (DAGs), lo que posibilita representar de forma explícita relaciones de dependencia condicional entre variables educativas clave. (Eberhardt et al., 2025)

Este enfoque parte del supuesto de que, bajo ciertas condiciones de regularidad, es posible identificar patrones causales subyacentes en los datos mediante técnicas computacionales de aprendizaje estructural. En particular, los algoritmos de búsqueda guiada por criterios de puntuación —como el algoritmo Hill-Climbing— permiten recorrer el espacio de modelos posibles y seleccionar aquella estructura que optimiza un criterio informativo, como el BIC (Bayesian Information Criterion). Tal procedimiento ha sido validado en diversas aplicaciones empíricas en contextos educativos (Chanthiran et al., 2022; Uglanova, 2021) y ha demostrado ser eficaz para evitar sobreajustes y minimizar la inclusión de relaciones espurias.

Esta fase exploratoria no busca confirmar hipótesis, sino generar una base empírica sólida que oriente las etapas siguientes del análisis. Por ejemplo, diversos trabajos consideran que las aristas con fuerza de asociación superior a un umbral determinado (por ejemplo, superior a 0.7) reflejan relaciones estructurales robustas que merecen ser exploradas con técnicas de inferencia. La utilidad de esta metodología se encuentra respaldada por una creciente literatura que incorpora técnicas de redes bayesianas y aprendizaje de grafos en estudios de educación superior y formación por competencias (Chanthiran et al., 2022; Uglanova, 2021)

Desde el punto de vista epistemológico, esta etapa se sitúa dentro del paradigma del descubrimiento causal exploratorio (Spirtes et al., 2001) y su implementación computacional se apoya en las formulaciones teóricas de (Pearl, 2003) sobre grafos causales y dependencia condicional.

### 2.2. Inferencia causal en contextos educativos

La inferencia consiste en estimar efectos causales a partir del marco de resultados potenciales. Esta inferencia puede calcularse como el impacto causal de un tratamiento sobre un resultado y esto puede medirse en contextos experimentales u no experimentales. (Hernan & Robins, 2024)

Uno de los principales desafíos metodológicos al abordar la inferencia causal en contextos no experimentales radica en la imposibilidad de establecer un mecanismo de asignación aleatoria de tratamientos o exposiciones. En ausencia de aleatorización, la estimación de efectos causales debe

enfrentarse a problemas como la presencia de variables de confusión no observadas, la selección sesgada de unidades de análisis y la potencial mediación o interacción entre factores no controlados. Esta situación genera un dilema central: ¿cómo atribuir validez a un efecto a una causa específica cuando no se ha manipulado directamente su exposición? (Arnold et al., 2010; Hammerton & Munafò, 2021)

Para sortear estas limitaciones, el marco de resultados potenciales —combinado con estructuras causales explícitas como los grafos dirigidos acíclicos (DAGs)— se ha posicionado como una estrategia metodológica robusta y replicable. Estos enfoques permiten modelar explícitamente las relaciones entre variables, establecer rutas plausibles de confusión y seleccionar, con base teórica, los conjuntos mínimos de covariables necesarios para obtener estimaciones no sesgadas (Hernan & Robins, 2024). La adopción de estos modelos en investigación educativa responde a la creciente disponibilidad de datos observacionales longitudinales y a la necesidad de evaluar intervenciones pedagógicas que no pueden ser sometidas a diseño experimental estricto (Okamoto, 2018; Páez & Ramírez, 2022; Saeedi et al., 2024)

En este tipo de modelos, se emplean diversas aproximaciones metodológicas para la estimación de efectos causales en contextos observacionales. Entre las más consolidadas se encuentran la fórmula de G-computation y los Modelos Estructurales Marginales (J. Robins, 1986), ampliamente utilizados en estudios longitudinales con múltiples confundidores. No obstante, existen otras estrategias complementarias y robustas —como el emparejamiento por puntaje de propensión, la estimación de máxima verosimilitud dirigida (TMLE), los estimadores doblemente robustos y los modelos de mediación causal— que también han demostrado ser eficaces bajo determinados supuestos y diseños. La selección metodológica depende del tipo de datos, el mecanismo de asignación y la plausibilidad de los supuestos de no-confusión. (Chanthiran et al., 2022; Uglanova, 2021)

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Consolidación del diseño metodológico

En consonancia con los estudios analizados, en el presente estudio se diseñó una arquitectura metodológica robusta, que articula el descubrimiento casual a partir del aprendizaje de estructuras causales mediante grafos dirigidos acíclicos (DAGs), con técnicas de inferencia basadas en el modelo de resultados potenciales. La combinación entre DAGs y estimación basada en resultados potenciales fortalece la validez interna del análisis. Esta aproximación ha demostrado ser eficaz en investigaciones recientes centradas en entornos educativos donde se implementan metodologías activas (Chanthiran et al., 2022; Uglanova, 2021), ya que permite generar evidencia empírica confiable respecto de qué factores condicionan el desarrollo de competencias clave y cómo estas impactan tanto en el rendimiento académico como en la percepción de autoeficacia del estudiantado. La Figura 1 muestra el enfoque metodológico propuesto, el cual tiene seis etapas de caracter cíclicas: 1) selección y adecuación del modelo pedagógico, 2) diseño e implementación de las estratégicas de enseñanza y aprendizaje, 3) recolección y preparación de los datos, 4) validación de supuestos imprescindibles para el análisis causal, 5) formulación de preguntas rectoras para el descubrimiento causal y su implementación, y 6) formulación de preguntas rectoras para la etapa de inferencia causal y su implementación. Finalmente, los resultados obtenidos son tenidos en cuenta para la readecuación del modelo pedagógico y se reinicia el ciclo.




*Figura 1: Enfoque metodológico - Fuente: Elaboración propia*

Esta estructuración en etapas hace una distinción entre la fase de descubrimiento causal y la fase de inferencia, lo cual permite abordar las preguntas de investigación con rigurosidad tanto en la fase exploratoria como en la fase confirmatoria del análisis causal, respetando los principios de validez interna y coherencia con el tipo de datos disponibles. A su vez, el carácter cíclico de la metodología permite poner en valor la posibilidad del rediseño de los instrumentos pedagógicos implementados debido a los resultados obtenidos en el análisis.

### 3.2. Selección e implementación del modelo de enseñanza y aprendizaje

#### 3.2.1. Estrategia pedagógica

- **Aprendizaje basado en problemas (ABP)**. Este enfoque pedagógico centra la instrucción en el análisis y resolución de problemas complejos del mundo real, promoviendo el desarrollo de competencias como el pensamiento crítico, la colaboración y la autonomía. En contextos de educación en ingeniería, ha demostrado ser eficaz para integrar conocimientos teóricos con su aplicación práctica, facilitando aprendizajes profundos y duraderos. Además, investigaciones recientes han documentado mejoras significativas en la motivación y el rendimiento académico cuando se implementa esta estrategia en cursos de ciencia, tecnología, ingeniería y matemática (STEM). (Arnold et al., 2010; Gálvez et al., 2006; Lavado-Anguera et al., 2024; Paz Penagos, 2012)
- **Aprendizaje situado (AS).** Este segundo enfoque radica en la importancia de la actividad, el contexto, la cultura, la mediación, la construcción conjunta de significados y los mecanismos de participación guiada, como una estrategia pedagógica para la formación integral de competencias en todas sus dimensiones. (Penagos, 2007)
- **Formación por competencias y taxonomía de Bloom.** Este modelo pedagógico se centra en el desarrollo integral de saberes, habilidades, actitudes y valores necesarios para actuar con eficacia en contextos diversos, articulando el saber, el saber hacer y el saber ser. A diferencia de enfoques tradicionales centrados en contenidos, la formación por competencias busca que el estudiante aplique el conocimiento en situaciones reales o simuladas, lo que promueve una mayor transferencia del aprendizaje. En el campo de la educación superior en ingeniería, este enfoque ha sido ampliamente adoptado por su capacidad para alinear los objetivos de aprendizaje con las demandas del entorno profesional y social. (Kowalski et al., 2015; Qi et al., 2024)
- **Microaprendizaje.** Por último, se ha incorporado también la estrategia pedagógica de pequeños aprendizajes (small bites, en inglés), la cual se basa en el principio de dividir contenidos complejos en unidades pequeñas y manejables, lo que permite al estudiantado avanzar progresivamente en la adquisición de conocimientos y habilidades. Este enfoque facilita la planificación del aprendizaje, reduce la sobrecarga cognitiva y fomenta una experiencia educativa más accesible y menos intimidante. En contextos de formación en ingeniería, se ha documentado su eficacia para mejorar la retención de conocimientos y fortalecer la autonomía del estudiantado (Betancur-Chicué & Muñoz-Repiso, 2023; Durán Alcalá & Escudero Nahón, 2023)
- **Metacognición**. La metacognición se refiere a la capacidad del estudiante para reflexionar activamente sobre su propio proceso de aprendizaje, evaluando la eficacia de las estrategias utilizadas y regulando su comportamiento cognitivo en función de metas específicas. Esta dimensión metacognitiva, reforzada a través de actividades guiadas y autoevaluaciones, ha demostrado estar fuertemente asociada con el desarrollo de la autonomía, la motivación intrínseca y la autoeficacia. Estudios previos han demostrado que la co-construcción de espacios para reflexionar sobre la práctica favorece la autorregulación del aprendizaje y mejora la percepción de claridad en las expectativas del curso. (Leopardi, 2018; Osses Bustingorry & Jaramillo Mora, 2008; Paz Penagos, 2012)

#### 3.2.2. Instrumentación didáctica

Para operacionalizar las estrategias pedagógicas, se diseñó e implementó un conjunto de instrumentos didácticos y evaluativos que permitieron monitorear y retroalimentar el proceso de enseñanza-aprendizaje en tiempo real:

- **Diseño por unidades-problema en entorno virtual.** Se utilizó un entorno virtual de aprendizaje en Moodle, el cual funcionó como plataforma integradora para la gestión de contenidos, tareas, foros y cronogramas, facilitando la comunicación asincrónica y la

trazabilidad del progreso de cada estudiante. Todos los contenidos fueron organizados por tipos de problemas.

- **Rúbricas de evaluación por competencia.** Se aplicaron rúbricas de evaluación construidas con base en las competencias definidas en el modelo teórico del curso, lo que aseguró la coherencia entre los objetivos de aprendizaje, las actividades propuestas y los criterios de evaluación. Estas rúbricas permitieron tanto la evaluación docente como la autoevaluación del estudiantado.
- **Parciales semanales.** Se implementaron evaluaciones semanales de baja duración, diseñadas para fomentar la evaluación continua y reducir la ansiedad frente a exámenes de alta consecuencia.
- **Banco de casos reales.** Se desarrolló un banco de casos reales, elaborados a partir de problemáticas de ingeniería y gestión de alto interés para la coyuntura y la zona de influencia de la región.
- **Trabajo Práctico Integrador.** Se diseñó una metodología específica con hitos, talleres y desafíos de crecimiento incremental para el desarrollo de un trabajo práctico que sirvió como base para el trabajo colaborativo y el desarrollo de habilidades de resolución de problemas en contextos situados.
- **Acuerdo pedagógico**. En el diseño del curso, se incorporaron espacios sistemáticos para que el estudiantado monitoree y evalúe su desempeño académico. Al inicio del curso, se estableció un momento de lectura colectiva sobre el programa pedagógico: los problemas que se trabajarán, la metodología a implementar y las competencias que se espera formar. Gradualmente se suministran autoevaluaciones en las cuales se miden rendimientos parciales y deltas de mejoría. Al finalizar el trayecto formativo, se invita al estudiantado a reflexionar sobre los aspectos estructurales del curso y el entorno en una autoevaluación 360º y sobre las habilidades desarrolladas individualmente.

### 3.3. Datos observacionales

Con el fin de evaluar empíricamente el impacto de las estrategias implementadas en el resultado académico, se construyó una base de datos observacional consolidada a partir de la implementación sistemática de cuatro instrumentos complementarios de recolección de datos. Los mismos fueron aplicados de forma cuatrimestral en el período 2022-2025 para todas las cohortes impartidas en tal período. Estos instrumentos fueron:

1. Un **sondeo inicial** de caracterización demográfica, académica e institucional.
2. El registro de **calificaciones obtenidas** en las distintas unidades temáticas del curso.
3. Una **rúbrica de evaluación por competencias** diseñada para registrar el nivel de adquisición de las competencias esperadas.
4. Un ejercicio de **retroalimentación final,** en el cual el estudiantado de manera anonimizada reflexiona sobre su experiencia de aprendizaje y autopercepción competencial

A partir de estos instrumentos se construyeron dos conjuntos de datos estructurados. La manipulación de los datos registrados y la elaboración de los conjuntos se realizaron en lenguaje R y el código fuente está disponible junto a la publicación del artículo. El primer conjunto de datos contiene observaciones a nivel individual de estudiantes que han recibido el programa pedagógico descrito (n > 300), recopiladas durante 8 cohortes académicas en el período de registro. El segundo conjunto de datos agrupa datos a nivel de cohorte (n = 16), de manera tal que se garantiza el tratamiento ético y anonimizado de los registros. La Tabla 1 y la Tabla 2 muestran las variables disponibles para cada conjunto de datos, incluyendo variables de contexto, variables resultado y variables de control, el tipo de variable y la descripción en términos de contexto de implementación.

*Tabla 1 Composición del conjunto de datos con registros individualizados.*

| Variable | Tipo | Descripción |
|---|---|---|
| ID_registro | Categórica | Identificador único anonimizado |
| ID_cohorte | Categórica | Codificación con año, cuatrimestre y turno de cursada |
| Engagement | Ordinal | Compromiso en el seguimiento de unidades |

| | | |
|---|---|---|
| Calificación por unidad | Numérica | Nota obtenida en cada unidad-problema del curso |
| Nivel por competencia | Ordinal | Nivel logrado de cada competencia |
| Autoevaluación final | Ordinal | Percepción sobre el proceso de aprendizaje |
| Rendimiento grupal | Categórica | Resultado final grupal del trabajo práctico integrador |
| Rendimiento individual | Categórica | Resultado final individual |

*Tabla 2 Composición del conjunto de datos con registros agrupados por cohorte.*

| **Variable** | **Tipo** | **Descripción** |
|---|---|---|
| ID_cohorte | Categórica | Codificación con año, cuatrimestre y turno de cursada |
| Total_estudiantes | Categórica | Cantidad de estudiantes por cohorte |
| Distribucion_género | Categórica | Proporción por género |
| Distribucion_edades | Numérica | Proporción por rango etario |
| small_bites | Ordinal | Valoración sobre la estrategia de pequeños desafíos |
| apr_situado | Ordinal | Valoración sobre la estrategia de aprendizaje situado |
| autodirigido | Ordinal | Valoración sobre la estrategia de aprendizaje autodirigido |
| etica | Ordinal | Valoración sobre el rol ético de la tutoría docente |
| tecnica | Ordinal | Valoración sobre el rol técnico de la tutoría docente |
| autoeficacia | Ordinal | Percepción sobre la autoeficacia |

## 4. DISCUSIONES

Sobre el diseño e implementación del curso de investigación operativa:

- Se exploraron diversas estrategias de enseñanza-aprendizaje centradas en el estudiante, tales como la formación por competencias, el aprendizaje basado en problemas (ABP), el aprendizaje situado y un conjunto de herramientas para su instrumentación.
- El equipo docente a cargo de la implementación de las metodologías reconoce efectos positivos en el estudiantado, a través de una activación del compromiso, el fomento de la autonomía y el aprendizaje significativo, al tiempo que se incorporan los entornos híbridos y multimodales.
- La didáctica, aunque concierte una minuciosa planificación, se percibe como una arquitectura flexible para el estudiantado, orientada por resultados de aprendizaje y adaptada a la diversidad de trayectorias, ritmos y estilos cognitivos.
- La integración de múltiples instrumentos didácticos permitió capturar dimensiones cognitivas, actitudinales y contextuales del proceso de aprendizaje, fortaleciendo la validez interna del análisis posterior.

Sobre el diseño e implementación parcial del análisis causal**:**

- Se ha consolidado un marco de trabajo para contextos donde no existe asignación aleatoria de tratamientos, pero sí se dispone de variabilidad suficiente en la exposición a determinadas intervenciones, tal como ocurre en el contexto educativo.
- Se ha consolidado la base de datos observacional para llevar adelante el análisis causal en la cual se combina información detallada sobre trayectorias individuales con patrones emergentes a nivel de cohorte.
- El diseño longitudinal y la rigurosa anonimización de los datos aseguran condiciones éticas y metodológicas adecuadas para el descubrimiento y la inferencia causal.
- Si bien aún quedan pendientes ciertas etapas de validación de supuestos, el conjunto de datos se presenta como un recurso robusto para el desarrollo de evidencia empírica y su

metodología de recolección y análisis podría ser replicable en futuros modelos de enseñanza-aprendizaje.

Las líneas futuras del presente trabajo, corresponden a la implementación completa del diseño metodológico descripto anteriormente:

- Se propone implementar el análisis de descubrimiento causal para determinar cuáles son las variables individuales que muestran una relación causal directa robusta con el desempeño académico, según la estructura aprendida en los datos observacionales.
- Luego, se propone seleccionar las competencias que presentan una relación directa robusta con el desempeño académico individual e implementar un análisis causal a partir de datos observacionales no experimentales, con el objetivo de conocer el efecto causal de cada una de las competencias sobre el desempeño académico individual.
- Análogamente, se propone determinar cuáles son las estrategias con inferencia directa robusta en la autoeficacia declarada por el estudiantado y cuál es el efecto causal de cada estrategia pedagógica sobre la autoeficacia individual.
- Finalmente, se propondrán mejoras sobre el diseño pedagógico sobre la base de los resultados obtenidos.

## 5. REFERENCIAS


Antonakis, J., Bendahan, S., Jacquart, P., & Lalive, R. (2010). On making causal claims: A review and recommendations. *The Leadership Quarterly*, *21*(6), 1086-1120 p. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2010.10.010

Arnold, B. F., Khush, R. S., Ramaswamy, P., London, A. G., Rajkumar, P., Ramaprabha, P., Durairaj, N., Hubbard, A. E., Balakrishnan, K., & Colford, J. M. (2010). Causal inference methods to study nonrandomized, preexisting development interventions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*(52), 22605-22610. https://doi.org/10.1073/pnas.1008944107

Betancur-Chicué, V., & Muñoz-Repiso, A. G.-V. (2023). Características del Diseño de Estrategias de microaprendizaje en escenarios educativos: Revisión sistemática. *RIED. Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, *26*(1), 201-222.

Chanthiran, M., Ibrahim, A. B., Rahman, M. H. A., & Mariappan, P. (2022). Bayesian Network Approach in Educational Application Development: A Systematic Literature Review and Bibliometric Meta-Analysis. *International Journal of Artificial Intelligence*, *9*(1), 8-16. https://doi.org/10.36079/lamintang.ijai-0901.348

Cheng, H. (2023). The effects of academic self-efficacy on the academic achievement of Chinese and foreign university students. *SHS Web of Conferences*, *180*, 04014. https://doi.org/10.1051/shsconf/202318004014

Durán Alcalá, M., & Escudero Nahón, A. (2023). Microlearning en el entorno educativo. *IE Revista de Investigación Educativa de la REDIECH*, *14*, e1763. https://doi.org/10.33010/ie_rie_rediech.v14i0.1763

Eberhardt, F., Kaynar, N., & Siddiq, A. (2025). Discovering Causal Models with Optimization: Confounders, Cycles, and Instrument Validity. *Management Science*, *71*(4), 3283-3302. https://doi.org/10.1287/mnsc.2021.02066

Friedrich, S., & Friede, T. (2020). Causal inference methods for small non-randomized studies: Methods and an application in COVID-19. *Contemporary Clinical Trials*, *99*, 106213. https://doi.org/10.1016/j.cct.2020.106213

Gálvez, I. E., Redruello, R. A., & Martín, R. C. (2006). *Aprendizaje basado en problemas (ABP). Estrategia metodológica y organizativa del currículum para la calidad de la enseñanza en los estudios de Magisterio*.

Glymour, C., Zhang, K., & Spirtes, P. (2019). Review of Causal Discovery Methods Based on Graphical Models. *Frontiers in Genetics*, *10*. https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00524

Hammerton, G., & Munafò, M. R. (2021). Causal inference with observational data: The need for triangulation of evidence. *Psychological Medicine*, *51*(4), 563-578. https://doi.org/10.1017/S0033291720005127

Hernan, M. A., & Robins, J. M. (2024). *Causal Inference: What If*.

Huber, M. (2024). *An Introduction to Causal Discovery* (No. arXiv:2407.08602). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.08602

Jyothi, D. N., & Dulhare, U. N. (2025). Understanding and Analysing Causal Relations through Modelling using Causal Machine Learning. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, *11*(1). https://doi.org/10.22399/ijcesen.1018

Kowalski, V., Enríquez, H., Santelices, I., & Erck, M. (2015). *Enseñanza de algoritmos en Investigación Operativa: Un enfoque desde la formación por competencias*.

Lavado-Anguera, S., Velasco-Quintana, P.-J., & Terrón-López, M.-J. (2024). Project-Based Learning (PBL) as an Experiential Pedagogical Methodology in Engineering Education: A Review of the Literature. *Education Sciences*, *14*(6), 617. https://doi.org/10.3390/educsci14060617

Leopardi, C. (2018). METACOGNICIÓN EN LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA: "HACIA UN NUEVO PARADIGMA". *Scientiarium*, *2*. https://investigacionuft.net.ve/revista/index.php/scientiarium/article/view/1144

Martínez-Abad, F., & León, J. (2023). Inferencia causal en investigación educativa: Análisis de la causalidad en estudios observacionales de carácter transversal. *RELIEVE. Revista Electrónica de Investigación y Evaluación Educativa*, *29*(2). https://www.redalyc.org/journal/916/91676028003/html/

Montenegro-Rueda, M., Luque-de la Rosa, A., Sarasola Sánchez-Serrano, J. L., & Fernández-Cerero, J. (2021). Assessment in Higher Education during the COVID-19 Pandemic: A Systematic Review. *Sustainability*, *13*(19), 10509. https://doi.org/10.3390/su131910509

Mosia, M., Egara, F. O., Nannim, F. A., & Basitere, M. (2025). Bayesian Hierarchical Modelling of Student Academic Performance: The Impact of Mathematics Competency, Institutional Context, and Temporal Variability. *Education Sciences*, *15*(2), 177. https://doi.org/10.3390/educsci15020177

Okamoto, K. (2018). Analysis of Influence Factors for Learning Outcomes with Bayesian Network. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, *22*(6), 943-955. https://doi.org/10.20965/jaciii 2018.p0943

Osses Bustingorry, S., & Jaramillo Mora, S. (2008). METACOGNICION: UN CAMINO PARA APRENDER A APRENDER. *Estudios pedagógicos (Valdivia)*, *34*(1). https://doi.org/10.4067/S0718-07052008000100011

Ouyang, F., Wu, M., Zheng, L., Zhang, L., & Jiao, P. (2023). Integration of artificial intelligence performance prediction and learning analytics to improve student learning in online engineering course. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, *20*(1), 4. https://doi.org/10.1186/s41239-022-00372-4

Páez, A. R., & Ramírez, N. D. G. (2022). Modelos predictivos del rendimiento académico a partir de características de estudiantes de ingeniería. *IE Revista de Investigación Educativa de la REDIECH*, *13*. https://www.redalyc.org/journal/5216/521670731008/html/

Paz Penagos, H. (2012). La enseñanza centrada en resolución de problemas pone en marcha estrategias metacognitivas en a formación del estudiante de ingeniería. *Revista Universidad EAFIT #DescubreyCrea*, *46*(157), 40-54.

Pearl, J. (2003). *CAUSALITY: MODELS, REASONING, AND INFERENCE*.

Penagos, H. P. (2007). El aprendizaje situado como una alternativa en la formación de competencias en ingeniería. *Revista Digital Educación en Ingeniería*, *2*(4), 1-13. https://doi.org/10.26507/rei.v2n4.55

Peters, J., Janzing, D., & Schölkopf, B. (2017). *Elements of Causal Inference: Foundations and Learning Algorithms*. MIT Press. https://mitpress.mit.edu/9780262037310/elements-of-causal-inference/

Qi, S., Mi, X., Niu, M., & Huang, D. (2024). Enhancing engineering education: The impact of college experience, interpersonal interaction, and student engagement on developing practice-oriented competencies. *European Journal of Engineering Education*, *0*(0), 1-28. https://doi.org/10.1080/03043797.2025.2522952

Robins, J. (1986). A new approach to causal inference in mortality studies with a sustained exposure period—Application to control of the healthy worker survivor effect. *Mathematical Modelling*, *7*(9), 1393-1512. https://doi.org/10.1016/0270-0255(86)90088-6

Robins, J. M., Hernán, M. A., & Brumback, B. (2000). Marginal structural models and causal inference in epidemiology. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, *11*(5), 550-560. https://doi.org/10.1097/00001648-200009000-00011

Saeedi, S., Božanić, D., & Safa, R. (2024). Strategic Analytics for Predicting Students' Academic Performance Using Cluster Analysis and Bayesian Networks. *Education Science and Management*, *2*(4), 197-214. https://doi.org/10.56578/esm020402

Spirtes, P., Glymour, C., & Scheines, R. (2001). *Causation, Prediction, and Search* (2.ª ed.). MIT Press.

Tadayon, M., & Pottie, G. (2021). *Causal Inference in Educational Systems: A Graphical Modeling Approach* (No. arXiv:2108.00654). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.00654

Tembrevilla, G., Phillion, A., & Zeadin, M. (2024). Experiential learning in engineering education: A systematic literature review. *Journal of Engineering Education*, *113*(1), 195-218. https://doi.org/10.1002/jee.20575

Triantafillou, S., Tsamardinos, I., & Tollis, I. (2010). Learning Causal Structure from Overlapping Variable Sets. *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, 860-867. https://proceedings.mlr.press/v9/triantafillou10a.html

Uglanova, I. (2021). Model Criticism of Bayesian Networks in Educational Assessment: A Systematic Review. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, *26*(1). https://doi.org/10.7275/21220899

Wang, S., Wang, F., Zhu, Z., Wang, J., Tran, T., & Du, Z. (2024). Artificial intelligence in education: A systematic literature review. *Expert Systems with Applications*, *252*, 124167. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124167

# IDENTIFICACIÓN DE ASIGNATURAS CRÍTICAS EN EL PRIMER AÑO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL MEDIANTE ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE RECURSADO

Giménez, Santiago; Andere, Mariano; Medrano, Luis; Reviello, Gonzalo

*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo.*
sgimenez@frh.utn.edu.ar

**RESUMEN**

En los primeros años de las carreras de ingeniería suelen concentrarse los mayores desafíos académicos, tanto por el cambio de nivel educativo como por la complejidad de las asignaturas. En este trabajo se analiza el desempeño académico en las asignaturas del primer nivel de la carrera de Ingeniería Industrial en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, mediante el uso de una base de datos en los ciclos lectivos comprendidos entre el 2018 y 2024. A través del análisis del porcentaje de recusantes, se busca detectar cuáles son las asignaturas que más obstáculos presentan en el primer nivel. Los resultados obtenidos pueden servir como punto de partida para futuras investigaciones que analicen con mayor profundidad por qué ocurre esto, y cómo podrían pensarse mejoras o apoyos para estudiantes en esa etapa.

**Palabras Claves:** Ingresantes, desempeño académico, recursado, dificultades.

**ABSTRACT**

In the first years of engineering programs, the greatest academic challenges are usually concentrated, both because of the change in educational level and the complexity of the subjects. This work analyzes academic performance in the first-level subjects of the Industrial Engineering program at the Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, using a database for the academic years between 2018 and 2024. Through the analysis of the percentage of students retaking subjects, we seek to detect which subjects present the greatest obstacles at the first level. The results obtained can serve as a starting point for future research that analyzes in greater depth why this occurs and how improvements or supports for students at that stage could be conceived.

**Keywords:** First-year students, performance, course repetition, difficulties.

## 1. INTRODUCCIÓN

El primer nivel universitario constituye un período crítico para la permanencia estudiantil, especialmente en carreras de alta exigencia como lo son las ingenierías. Según datos oficiales del Ministerio de Educación (2020), el 38,1% de los estudiantes que ingresaron en 2019 no se reinscribieron al siguiente ciclo lectivo, lo que evidencia un elevado riesgo de abandono.

Paz (2023) señala que la estructura curricular forma parte de los factores estructurales con más impacto negativo en la permanencia estudiantil en carreras de ingeniería. Además, la pandemia de COVID-19 exacerbó estos problemas y citando a la UNESCO, “El COVID-19 ha perturbado enormemente las prácticas normales de enseñanza y aprendizaje…”, evidenciando la necesidad de fortalecer las capacidades de adaptación y apoyo a estudiantes en modalidades virtuales e híbridas -como fue pronosticado por Seminara M.P. (2021) al decir “El aislamiento ocasionado a raíz de la pandemia COVID-19, provocó una serie de medidas de emergencia en la Educación Superior que, posiblemente, repercutirán en la permanencia universitaria”.-

Esta problemática también se refleja en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo (UTN FRH), donde comprender los factores que inciden en el recursado de asignaturas iniciales resulta fundamental para explicar la permanencia y el rendimiento académico.

Diversos estudios previos (Vásquez et al., 2021; Wang et al., 2022) destacan que la permanencia universitaria no depende únicamente del rendimiento académico, sino también de la integración social, factores socioeconómicos y niveles de autoeficacia percibida. En este marco, disponer de diagnósticos iniciales que permitan identificar patrones en los índices de aprobación y recursado constituye un insumo clave para diseñar estrategias institucionales de mejora.

En la UTN FRH, el recorrido formativo comienza con el Seminario de Ingreso Universitario (SIU), cuyo propósito es nivelar conocimientos y acompañar la transición hacia la vida universitaria. Los estudiantes que aprueban esta instancia acceden al primer nivel de la carrera de Ingeniería Industrial, compuesto por ocho asignaturas, cuyo régimen de cursada es anual, divididas en dos grupos: cinco asignaturas homogéneas (comunes a todas las ingenierías de la UTN: Álgebra y Geometría Analítica, Análisis Matemático I, Física I, Química General e Ingeniería y Sociedad) y tres específicas de la carrera (Informática I, Sistemas de Representación y Pensamiento Sistémico). Esta distinción entre asignaturas homogéneas y específicas resulta relevante para el análisis comparativo de los datos académicos.

Además, es importante destacar los posibles caminos para la aprobación o no de una asignatura. Conforme a la Ordenanza 1549-2016 (Reglamento de Estudio de la UTN), se establecen condiciones específicas basadas en un régimen de evaluación continua:

- Aprobación directa: Tener como mínimo 75% de asistencia a clases, cumplir con actividades de formación práctica, aprobar con nota 6 o más las instancias de evaluación. Si no se aprueba alguna de estas instancias, el estudiante tendrá al menos una instancia de recuperación.
- Aprobación no directa: El estudiante que habiendo demostrado niveles mínimos y básicos de aprendizaje no alcance los objetivos de aprobación directa, estará habilitado a rendir evaluación final.
- No aprobación: El estudiante que no haya demostrado niveles mínimos y básicos de aprendizaje deberá recursar la asignatura.

El presente estudio se centra en el análisis cuantitativo de los porcentajes de recursado durante el ciclo lectivo 2024, considerando exclusivamente a estudiantes ingresantes, definidos como aquellos que cursaron el primer nivel por primera vez y habiendo realizado el SIU en la Regional Haedo. Los datos provienen del Sistema de Gestión Académica (SYSACAD) y permiten: (1) identificar cuáles son las asignaturas más críticas en términos de aprobación; (2) analizar tendencias temporales para distinguir entre problemas coyunturales y desafíos estructurales; y (3) generar evidencia empírica que fundamente estrategias institucionales de mejora.

La importancia de este estudio se enmarca en un contexto de transformación académica, donde la UTN FRH ha actualizado sus diseños curriculares de las carreras de ingeniería promoviendo la enseñanza por competencias y un enfoque centrado en el estudiante. A ello se suman diversas iniciativas

institucionales orientadas a mejorar la retención y la graduación. Finalmente, resulta significativo señalar que la cantidad de ingresantes a la carrera se ha sostenido en los últimos años, lo cual refuerza la importancia de abordar de manera integral los desafíos vinculados a la permanencia y al rendimiento en las asignaturas iniciales.

### 1.1. Análisis de todas las asignaturas correspondientes al primer nivel en Ingeniería Industrial

Como primer paso de esta investigación, se decidió analizar los resultados académicos de los estudiantes ingresantes del ciclo lectivo 2024, ya que es el período más reciente. Este recorte nos brinda una mirada actualizada y comparativa sobre el desempeño estudiantil, y nos permite identificar cuáles son las asignaturas que presentaron mayores dificultades de aprobación y cuáles resultaron más accesibles para los estudiantes.

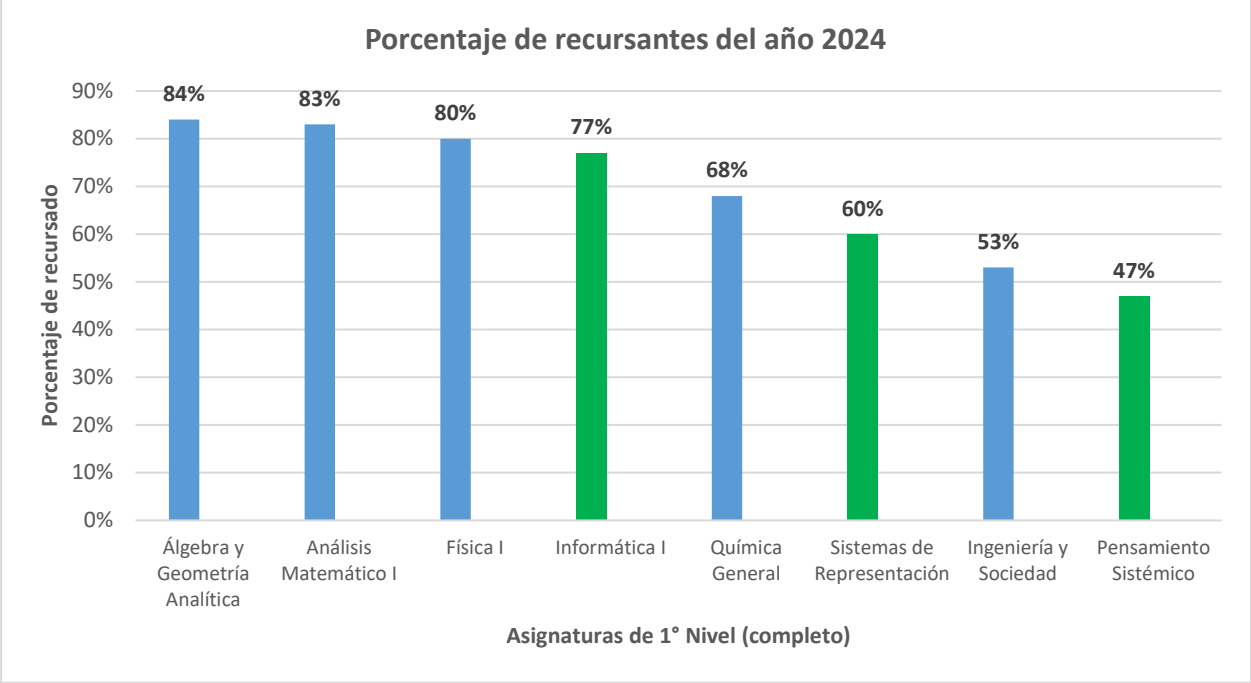



*Gráfico 1 – Porcentaje de recursantes por asignatura (Ciclo 2024)*

El *Gráfico 1* muestra el porcentaje de recursado de las materias del primer nivel en ingeniería industrial en el ciclo 2024

#### 1.1.1. Asignaturas con mayor dificultad de aprobación

Las asignaturas que muestran los índices más alarmantes son del grupo de las homogéneas: Álgebra y Geometría Analítica, con un 84% de ingresantes que no lograron cumplir con los requisitos mínimos de aprobación, seguida por Análisis Matemático I (83%) y Física I (80%). Dicho de otra manera, sólo 1 de cada 5 estudiantes logra aprobar alguna de las asignaturas mencionadas.

#### 1.1.2. Comportamientos atípicos

Informática I emerge como un caso preocupante al alcanzar un 77% de recursado, ubicándose en el cuarto puesto, estando más cercano a las asignaturas homogéneas que de las específicas.

#### 1.1.3. Asignaturas intermedias

Química General (68%) y Sistemas de Representación (60%) se ubican en un rango intermedio dentro del espectro de dificultad. Lo llamativo es que Química General, aun integrando el grupo de asignaturas de base científico-cuantitativa —junto con Álgebra y Geometría Analítica, Análisis Matemático I y Física

I—, presenta índices de recursado considerablemente más bajos que estos pares. Este comportamiento la posiciona como un caso atípico dentro del conjunto.

### 1.1.4. Asignaturas con mejor desempeño

Las asignaturas con mejor desempeño relativo son Ingeniería y Sociedad (53%) y Pensamiento Sistémico (47%), ya que presentan los menores niveles de recursado y, por ende, mayores niveles de aprobación. Sin embargo, el hecho de que ambos valores se mantengan por encima del 45% muestra que, aun en el escenario más favorable, las tasas de recursado siguen siendo preocupantes.

El panorama descripto evidencia la heterogeneidad de los resultados académicos en el primer nivel de Ingeniería Industrial, con asignaturas que presentan índices críticos de recursado y otras que, aun con valores relativamente menores, no están exentas de dificultades significativas. Para profundizar este diagnóstico, resulta necesario realizar un análisis comparativo de la evolución histórica de las asignaturas con mayor recursado. De este modo, se busca identificar si los elevados porcentajes observados responden a patrones persistentes en el tiempo o, por el contrario, a circunstancias coyunturales asociadas a determinados períodos.

## 1.2. Análisis de las dos asignaturas con mayor porcentaje de recursado

Como mencionamos previamente, las asignaturas que en el ciclo lectivo 2024 resultaron con mayor dificultad de aprobación fueron Álgebra y Geometría Analítica y Análisis Matemático I por lo tanto, lo que haremos es un análisis comparativo del periodo comprendido entre los años 2018-2024:

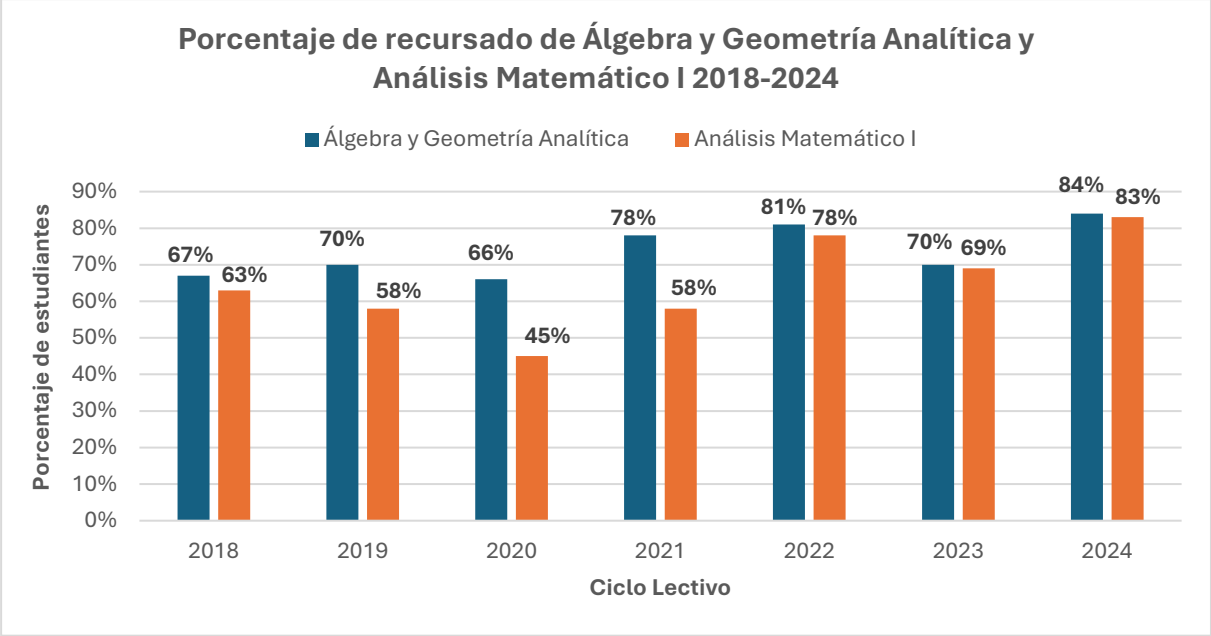



*Gráfico 2 – Asignaturas con mayor porcentaje de recursantes (2018–2024)*

El *Gráfico 2* muestra la evolución histórica del porcentaje de recursado en dos asignaturas del primer año de Ingeniería Industrial: Álgebra y Geometría Analítica y Análisis Matemático I. El análisis de esta serie temporal permite reconocer patrones relevantes que van más allá de las fluctuaciones anuales.

### 1.2.1. Periodo 2018-2019: Estabilidad relativa

En este lapso se registraron los valores más bajos de recursado en ambas asignaturas. Antes de la pandemia, la tendencia mostraba un comportamiento relativamente estable. En comparación con el conjunto de asignaturas analizadas en 2024, estas dos se ubicaban dentro de la media, considerando que los extremos de recursado en el período de la pandemia fluctúan entre el 50% y el 80%.

### 1.2.2. Periodo 2020-2021: Clases virtuales / pandemia

En este periodo y más allá de las particularidades de la modalidad virtual, Álgebra y Geometría Analítica mostró índices de recursado bastante mayores que los de Análisis Matemático I, donde la misma tuvo su mínimo histórico dentro del periodo total considerado inicialmente, para luego tener un porcentaje de recursado igual al año 2019.

### 1.2.3. Periodo 2022-2024: Postpandemia

En el gráfico se aprecia un aumento del recursado en 2022, seguido de una baja en 2023 y un nuevo incremento en 2024, año en que ambas asignaturas alcanzaron sus valores más altos del período.

### 1.2.4. Periodo 2018-2024: Análisis retrospectivo

El análisis global muestra una tendencia sostenida al alza en el recursado, especialmente después de la pandemia. Aunque en 2023 se registró un descenso, la tendencia general terminó consolidándose en un incremento de más de 15 puntos porcentuales entre 2018 y 2024, tanto en Análisis Matemático I como en Álgebra y Geometría Analítica.

El análisis histórico de Álgebra y Geometría Analítica y de Análisis Matemático I permitió reconocer que sus elevados índices de recursado responden a tendencias persistentes en el tiempo más que a fluctuaciones coyunturales. Ahora bien, para completar la caracterización del primer nivel, resulta necesario considerar el comportamiento opuesto: aquellas asignaturas que registran los menores porcentajes de recursado. A continuación, se examinan estos casos, con el fin de identificar si la baja incidencia observada constituye también una tendencia sostenida o un fenómeno particular de determinados períodos.

## 1.3. Análisis de las dos asignaturas con menor porcentaje de recursado.

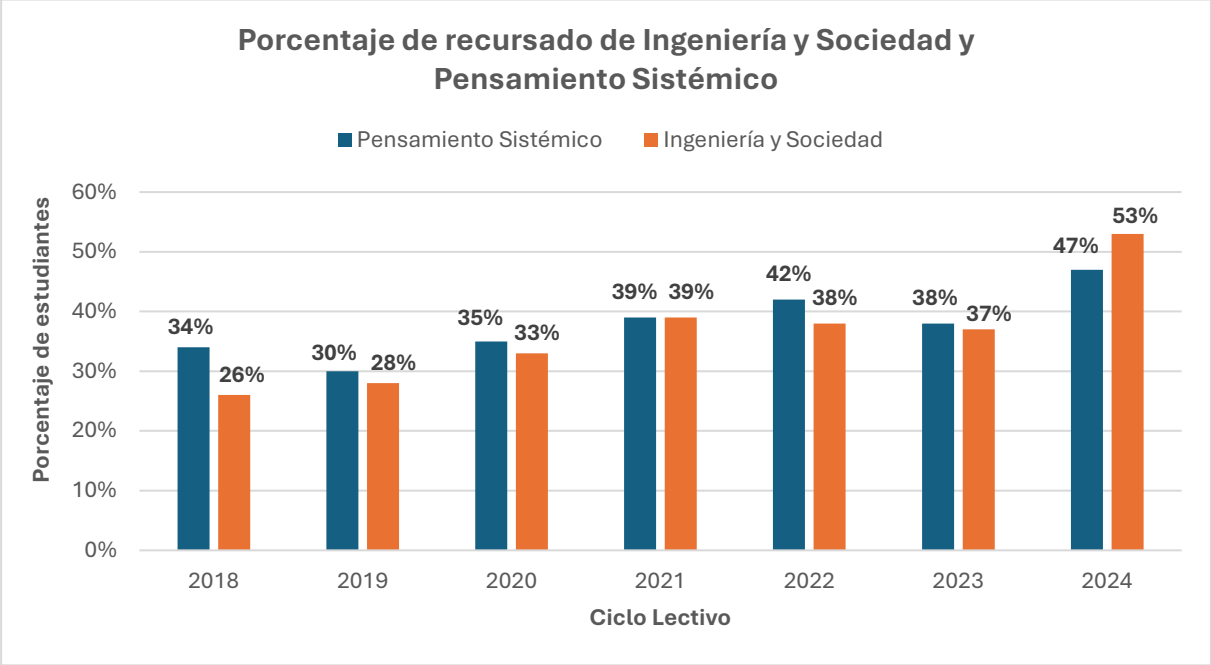



*Gráfico 3 – Asignaturas con menor porcentaje de recursantes por ciclo lectivo (2018–2024)*

El Gráfico 3 revela la evolución de dos asignaturas que tradicionalmente han presentado los menores índices de dificultad en el primer nivel de la carrera de Ingeniería Industrial: Ingeniería y Sociedad y

Pensamiento Sistémico. Su análisis comparativo ofrece perspectivas valiosas sobre los cambios en el desempeño académico en asignaturas de perfil social y aplicado.

### 1.3.1. Periodo 2018-2019: Estabilidad relativa

Durante estos años se registraron los niveles más bajos de recursado en ambas asignaturas. La tendencia fue relativamente estable, con valores que oscilaron entre el 26% y el 34%. En comparación con el resto de las asignaturas analizadas en 2024, estos porcentajes se ubican por debajo de la media, ya que los extremos de recursado en otras asignaturas rondaban entre el 50% y el 80%.

### 1.3.2. Periodo 2020-2021: Clases virtuales / pandemia

En este período se evidencia un leve incremento en los índices de recursado:

- Ingeniería y Sociedad pasó del 33% en 2020 al 39% en 2021.
- Pensamiento Sistémico subió del 35% en 2020 al 39% en 2021.

A diferencia de lo observado en otras asignaturas, el impacto de la virtualidad fue moderado, con un crecimiento sostenido, pero sin picos abruptos.

### 1.3.3. Periodo 2022-2024: Postpandemia

Tras la pandemia, la evolución muestra un patrón mixto:

- En 2022 se produce un nuevo aumento (a 38% en Ingeniería y Sociedad y a 42% en Pensamiento Sistémico).
- En 2023 ambas asignaturas se estabilizan con una ligera baja.
- En 2024 se registra el salto más marcado de todo el período: a 53% en Ingeniería y Sociedad y a 47% en Pensamiento Sistémico, alcanzando los valores más altos de la serie.

### 1.3.4. Período 2018-2024: Análisis retrospectivo

El análisis global refleja una tendencia de crecimiento sostenido en el recursado de ambas asignaturas.

- Ingeniería y Sociedad aumentó 27 puntos porcentuales: de 26% en 2018 a 53% en 2024.
- Pensamiento Sistémico creció 13 puntos porcentuales: de 34% a 47% en el mismo lapso.

En términos relativos, el incremento fue más pronunciado en Ingeniería y Sociedad, que duplicó su porcentaje inicial, mientras que Pensamiento Sistémico mostró un ascenso no tan marcado, pero notablemente elevado.

## 3. CONCLUSIONES

Entre 2018 y 2024 se confirma un recursado alto y persistente en el primer nivel de la carrera de Ingeniería Industrial, con una suba posterior a la pandemia. Aun las asignaturas de mejor desempeño mantienen niveles absolutos elevados. El problema no es uniforme: varía por asignatura y cohorte, lo que sugiere la intervención de factores estructurales y de condiciones de cursada, además de los individuales.

Frente a este panorama, se proponen distintas acciones que consideramos que podrían implicar una disminución en el recursado de asignaturas. Primero, implementar diagnósticos tempranos de saberes (razonamiento cuantitativo y manejo de herramientas básicas) para orientar nivelaciones desde el inicio. Segundo, fortalecer el seguimiento continuo de trayectorias con más instancias formativas y feedback temprano que permitan corregir a tiempo. Tercero, atender la asistencia sostenida como indicador crítico, dado que las caídas tempranas podrían predecir mayor recursado. Cuarto, considerar el efecto cohorte: quienes atravesaron la virtualidad en sus estudios medios, requerirían apoyos específicos.

Como próximos pasos, se propone consolidar una base longitudinal estudiante–asignatura, medir asistencia semanal y su evolución, relevar esquemas de evaluación por cátedra (oportunidad, cantidad, recuperatorios, ponderaciones) y aplicar diagnósticos de ingreso con encuestas breves sobre la experiencia de cursada. Con esta evidencia, se testearán pilotos de nivelación focalizada, evaluación con feedback temprano y alertas por asistencia, evaluando su impacto para escalar lo que resulte eficaz, orientados a reducir el recursado en el corto y mediano plazo.

## 4. REFERENCIAS.


1. Ministerio de Educación de la Nación (2022). República Argentina. Síntesis de Información Estadísticas Universitarias 2020-2021. Secretaría de Políticas Universitarias. Ministerio de Educación de la Nación. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sintesis_2021-2022_sistema_universitario_argentino_1.pdf.
2. Paz, H. R. (2023). Causal analysis of first-year course approval delays in an engineering major. https://arxiv.org/abs/2308.16707
3. Seminara, M. P. (2021). De los efectos de la pandemia COVID -19 sobre la deserción universitaria: desgaste docente y bienestar psicológico estudiantil. Revista Educación Superior Y Sociedad (ESS), 33(2), 402-421. https://doi.org/10.54674/ess.v33i2.360
4. UNESCO-IESALC (2022). Educación superior y COVID-19: Situación y perspectivas futuras.
5. Universidad Tecnológica Nacional. (2016). Ordenanza N.º 1549: Reglamento académico para la aprobación de asignaturas. Consejo Superior de la Universidad Tecnológica Nacional.
6. Vásquez, S., Araya, F., & Ramírez Correa, H. S. (2021). Estudio exploratorio de los impactos de la pandemia del COVID-19 en el aprendizaje de estudiantes de ingeniería. Cong. Chile Edu. Ing. https://www.researchgate.net/publication/355982823_Estudio_exploratorio_de_los_impactos_de_la_pandemia_del_COVID-19_en_el_aprendizaje_de_estudiantes_de_ingenieria
7. Wang, X., Dai, M., & Mathis, R. (2022). The influences of student- and school-level factors on engineering undergraduate student success outcomes. International Journal of STEM Education, 9, 23. https://doi.org/10.1186/s40594-022-00338-y

# PROPUESTA DIDÁCTICA PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE FÍSICA: UN ENFOQUE PARA MEJORAR SU INTERPRETACIÓN Y RESOLUCIÓN EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA

Gon Fabián R.; Enrique Claudio; Gutiérrez Carlos; Sanseverinati Carlos; Moschen Tatiana

*Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina*
*fgon@frsf.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

La presente investigación tiene como objetivo analizar el impacto del uso de modelos físicos o maquetas en el proceso de evaluación de una propuesta didáctica en la asignatura Física I. Esto se diseñó con el fin de mejorar la comprensión de los contenidos y fomentar la cultura científica en estudiantes de Ingeniería Industrial de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional. Esta experiencia se desarrolla desde el año 2024 y continúa en 2025, con la participación de aproximadamente 110 estudiantes de primer año. La propuesta se enmarca en un enfoque de evaluación por competencias, integrando Modelos físicos como recurso pedagógico para vincular las situaciones problemáticas con los contenidos relativos a las leyes de Newton. Se detectaron algunos aspectos negativos como un bajo nivel de dedicación horaria al estudio, especialmente en la práctica, lo cual guarda relación directa con las dificultades expresadas. Los resultados evidencian que esta estrategia permite superar algunas de las limitaciones de la enseñanza tradicional, reduciendo el fracaso académico e incrementando la motivación, el interés, los aprendizajes significativos y la capacidad de resolución de problemas, contribuyendo así al fortalecimiento de la cultura científica en el ámbito de la formación en ingeniería.

**Palabras Claves:** Aprendizaje por competencias, cultura científica, Dinámica, Modelos físicos, Maquetas.

**ABSTRACT**

This research aims to analyze the impact of using physical models or mock-ups in the evaluation process of a didactic proposal in the subject Physics I, with the objective of enhancing content comprehension and fostering scientific culture among Industrial Engineering students at the Santa Fe Regional Faculty of the National Technological University. The initiative has been implemented since 2024 and continues through 2025, involving approximately 110 first-year students. The proposal is framed within a competency-based assessment approach, incorporating physical models as pedagogical tools to connect problem statements with the content related to Newton's laws. Some negative aspects were detected, such as a low number of hours dedicated to studying, especially in practice, which is directly related to the difficulties expressed. The results indicate that this strategy helps overcome several limitations of traditional teaching methods, reducing academic failure while increasing motivation, interest, meaningful learning, and problem-solving abilities. This contributes significantly to strengthening scientific culture within engineering education.

**Keywords:** Competency-based learning, scientific literacy, dynamics, physical models, and scale models.

## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene como objetivo proponer una alternativa para abordar en los estudiantes de primer año las dificultades en el aprendizaje de la Física, haciendo foco fundamentalmente en la competencia “Resolución de Problemas”.

Se presenta la experiencia realizada en un curso de primer año de Física del ciclo básico de la carrera de Ingeniería Industrial de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional (FRSF-UTN). Se implementó el uso de Modelos Físicos o maquetas en este caso para la resolución de un problema de Física en donde se aplicaron los conceptos relativos a las leyes de Newton. En años anteriores se han realizado experiencias similares y las mismas abarcaron otros temas como el de equilibrio estático que se encuentran en las unidades temáticas más avanzadas del cursado. (Fabian Gon et al 2024)

La experiencia desarrollada este año se implementó en un tema previo al de los evaluados en años anteriores, con el objetivo de realizar una observación en otra temática que en algunos casos genera dificultades a los estudiantes para su interpretación y correcto desarrollo, como consecuencia de tener adquiridos conceptos erróneos en una etapa previa del aprendizaje. Los temas abordados en este caso han sido la Ley de Newton, diagrama de cuerpo libre, sistemas de referencia entre otros contenidos.

Diversas investigaciones en el ámbito de las Ciencias Físicas han evidenciado las dificultades que enfrentan los estudiantes en el proceso de aprendizaje de esta disciplina, las cuales se manifiestan en altos índices de fracaso académico y desmotivación. A partir de estos hallazgos, se ha suscitado una reflexión crítica respecto al modelo tradicional de enseñanza, caracterizado por una transmisión unidireccional de conocimientos por parte del docente, quien presenta conceptos, teorías, leyes y ecuaciones como saberes acabados y definitivos. En este enfoque, el rol del estudiante se reduce a una posición pasiva, centrada en la memorización y aceptación de contenidos, sin que medie un proceso activo de análisis o interpretación de los fenómenos físicos. En consecuencia, el conocimiento se percibe como algo externo y ajeno al sujeto que aprende, lo que dificulta una apropiación significativa del mismo. (Pozo et al 1998)

La resolución de problemas en Física constituye una competencia fundamental en la formación de ingenieros, ya que proporciona herramientas analíticas para comprender, modelar y solucionar situaciones reales en contextos tecnológicos. En este sentido, la Física no solo permite predecir comportamientos de sistemas, sino también fundamentar decisiones de diseño y optimización en ingeniería. (Serway & Jewett, 2014)

El uso de modelos Físicos o maquetas como recurso didáctico complementa este proceso al ofrecer representaciones tangibles que facilitan la visualización de fenómenos físicos complejos, favoreciendo el aprendizaje activo y el desarrollo del pensamiento espacial. (Gil-Pérez et al., 2002)

Estos permiten experimentar con modelos a escala, promover el trabajo colaborativo y fortalecer la relación entre teoría y práctica. Esta integración mejora la comprensión conceptual y fomenta habilidades clave en ingeniería, como la creatividad, el análisis crítico y la transferencia de conocimientos a contextos reales y su vinculación con la teoría. (Wankat & Oreovicz, 2015)

Proponemos realizar la resolución de problemas de Física, en conjunto con el uso de modelos físicos o maquetas y contribuir así significativamente a una formación más integral y aplicada en Ingeniería.

Según el diccionario de la lengua española de la Real Academia Española (RAE 2014), la palabra "problema" tiene varios significados de los cuales consideraremos los siguientes: Planteamiento de una situación cuya respuesta desconocida debe obtenerse a través de métodos científicos o lógicos, Enunciado en que se da una relación entre datos conocidos y desconocidos que debe resolverse.

Estos dos significados se asocian en mayor medida con el sentido que nosotros habitualmente como ingenieros interpretamos sobre el significado de la palabra problema.

De igual manera al querer definir los términos "modelo físico" y "maqueta" que son empleamos habitualmente nos encontramos que según su formación específica las personas lo interpretan con un significado similar. Aunque la RAE no ofrece una definición específica para "modelo físico", el término se entiende generalmente como una representación tangible de un objeto o sistema, construida para estudiar o simular su comportamiento. Mientras que “maqueta” define un modelo a escala reducida de una construcción. (Real academia 2014)

En el contexto de la Física y la educación científica, ambos términos se utilizan para representar y estudiar fenómenos o sistemas complejos. La maqueta suele ser una representación Física a escala

de un objeto o sistema, mientras que el modelo Físico puede referirse tanto a representaciones Físicas como a representaciones teóricas o matemáticas.

La relación entre ambos radica en que tanto las maquetas como los modelos físicos sirven como herramientas para comprender, analizar y comunicar conceptos científicos, permitiendo una mejor visualización y comprensión de los fenómenos estudiados.

Intentaremos demostrar en este trabajo que es posible centrar la resolución de problemas de lápiz y papel sobre nuevas bases, transformándolo en una actividad creativa e interesante para los estudiantes. Demostrando que las actividades de resolución de problemas de lápiz y papel y el empleo de materiales didácticos como maquetas o modelos físicos se pueden fusionar en una única actividad investigativa que permita desarrollar en los estudiantes nuevas formas de interpretar los problemas de Física. Con el fin de unificar los conceptos de maquetas y modelos físicos emplearemos en este trabajo el de Modelo Físico (MF).

La Educación Basada en Competencias (EBC) y el Aprendizaje Centrado en el Estudiante (ACE) promueven una transformación profunda en las prácticas pedagógicas, orientada a favorecer aprendizajes contextualizados y el desarrollo de competencias profesionales, todo ello bajo una mediación docente activa y reflexiva. En este enfoque, la evaluación del aprendizaje adquiere un papel fundamental dentro del proceso de planificación didáctica, al integrarse estrechamente con las estrategias pedagógicas seleccionadas y las actividades formativas realizadas por el estudiantado. Evaluar en el marco de la EBC implica evidenciar la capacidad del estudiante para movilizar de forma integrada conocimientos, habilidades, actitudes, valores y destrezas en contextos de acción concretos. (Tobón 2013)

La resolución de problemas en dinámica Física, al involucrar conceptos abstractos como fuerzas, aceleración y movimiento, pueden resultar desafiantes para los estudiantes y más aun cuando no comprenden o visualizan la situación en particular que es planteada. Para facilitar la comprensión y aplicación de estos conceptos, el uso de material didáctico se ha identificado como una estrategia pedagógica eficaz. Estos MF permiten representar de manera tangible fenómenos dinámicos, ofreciendo a los estudiantes una herramienta visual y manipulativa que facilita la internalización de principios físicos fundamentales.

En este contexto, la construcción y utilización de MF sencillos, como los propuestos por Medina Mosquera (2019), han demostrado ser efectivos en la enseñanza de fenómenos físicos complejos. Estos modelos, diseñados para ser manipulativos y de bajo costo, permiten a los estudiantes visualizar y experimentar directamente con conceptos como la dilatación térmica y el magnetismo, promoviendo una comprensión más profunda y significativa de los fenómenos estudiados.

Por lo tanto, integrar el uso de MF en la resolución de problemas de dinámica Física no solo enriquece la experiencia de aprendizaje, sino que también fortalece la capacidad de los estudiantes para aplicar conceptos teóricos en situaciones prácticas, promoviendo un aprendizaje más activo, significativo, desarrollando en ellos nuevas competencias.

En el ámbito educativo y científico, la matemática y la Física desempeñan un papel fundamental al proporcionar al estudiantado las herramientas y conocimientos necesarios para abordar con éxito las asignaturas propias de su carrera. Estas materias no deben concebirse como un fin en sí mismas, sino como recursos esenciales que respaldan la formación profesional.

Desde esta perspectiva, la enseñanza de las ciencias básicas se presenta como una propuesta educativa orientada a fomentar la reflexión sobre la relación entre la matemática, la Física, la química y otras disciplinas científicas afines. Esta propuesta abarca diversas dimensiones (curricular, didáctica, cognitiva y epistemológica) con el objetivo de fortalecer su enseñanza y aplicación en distintos campos del conocimiento (Rodríguez & Pérez, 2020).

El carácter problemático de una situación depende de los conocimientos, experiencia, etc., de los individuos. Hay en estas ideas una primera fuente para la comprensión de los resultados tan negativos alcanzados en la enseñanza habitual de la ciencia y en especial de la Física. Nos planteamos la relación entre dichas ideas, la práctica habitual de la resolución de problemas y la implementación de modelos físicos.

Nos planteamos en qué medida las explicaciones de los enunciados de los problemas realizadas por los docentes o que encontramos en los libros de textos están establecidas de tal manera que facilita la interpretación por parte de los estudiantes del contexto establecido.

Los docentes de Física suelen explicar los "problemas" como algo que se sabe hacer, como algo cuya solución se conoce y que no genera dudas, el profesor conoce la situación y la explica como un proceso lineal, con toda claridad. Los estudiantes pueden aprender dicha solución y repetirla ante situaciones idénticas, pero no aprenden a abordar un verdadero problema y cualquier pequeño cambio genera en estos una frustración.

Se puede esperar, en efecto, que ante situaciones en donde los enunciados de los problemas establezcan representaciones o planteos poco claros los estudiantes adopten actitudes características de la enseñanza habitual y consideren los problemas como situaciones que los frustran y que son muy complejos.

Al resolver un problema, el alumno se ve estimulado a buscar aquellas ecuaciones que pongan en relación los datos e incógnitas proporcionados en el enunciado, y tiende a caer en un puro operativismo.

La presencia de los datos en el enunciado y la indicación de todas las condiciones existentes responde a concepciones inductivistas y orienta la resolución hacia un concepto de problema que escapa de la realidad del problema que el estudiante como ingeniero deberá enfrentar pero que a la vez le permite construir una metodología organizada para estas situaciones.

El empleo de los MF en la resolución de los problemas, planteando situaciones en donde a los mismos estudiantes les van surgiendo diferentes cuestionamientos constituye un paso esencial en el desbloqueo de la enseñanza habitual de problemas y sus limitaciones en cuanto a los temas y aspectos involucrados en la resolución.

## 2. METODOLOGIA

Las principales etapas establecidas en el desarrollo de este trabajo han sido:

- Considerar la estructura cognoscitiva de los estudiantes como punto de partida de la construcción del conocimiento científico teniendo en cuenta la experiencia recogida por los docentes en más de 18 años frente al aula, mediante una evaluación diagnóstica al comienzo del ciclo lectivo.
- Realizar la actividad de enseñanza de la Física basada en un problema y conducir a los estudiantes en esta actividad habitual, buscando en ellos el sentido a los temas y su vinculación con la realidad.
- Implementar el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física, considerando el grupo de actividades que el estudiante es capaz de realizar con la ayuda, colaboración, la orientación del Profesor y el empleo del MF.
- Evaluación por medio de una encuesta de aspectos referentes al estudio, organización de la asignatura y del impacto en los estudiantes del empleo del MF.

El objetivo propuesto por la cátedra al implementar este tipo de desarrollos pedagógicos en el aula es promover el análisis crítico y el debate fundamentado sobre los resultados que los alumnos obtengan al resolver un problema empleando para ello un MF.

Al cambiar el sentido y desarrollo tradicional de la clase lo que buscamos es que se fomente en la misma el debate para explorar nuevos temas y analizar su impacto en el aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería. Al generar espacios para la experimentación creativa no solo de los estudiantes sino también de los docentes, permite abordar nuevos temas y crear o utilizar espacios para que el personal docente desarrolle nuevas ideas en un entorno colaborativo y seguro, estimulando la experimentación y la creatividad.

Aspiramos a un análisis sobre las prácticas docentes y así incorporar momentos de autoevaluación y reflexión para que el cuerpo docente analice sus enfoques en la enseñanza, comparta experiencias y fomente la mejora continua que pueda impactar positivamente en el estudiantado.

Inicialmente se analizaron los datos obtenidos de los años anteriores y los resultados en cuanto a participación en clase aplicando las metodologías tradicionales, la participación en las experiencias de laboratorio, el nivel de aprobación de los alumnos en los exámenes y las resoluciones que estos realizaban.

La metodología del trabajo luego de la evaluación diagnostica incluye tres fases más activas. Una primera fase en donde los estudiantes deben interpretar y resolver un problema establecido por el docente y en el cual se han indicado dentro de las cuestiones solicitadas varias alternativas de análisis.

Los alumnos deben resolver el problema a su elección solos o con un compañero, una vez resuelto el mismo en lápiz y papel, lo deben subir al campus virtual de la asignatura en formato PDF.

Esta actividad que denominamos evaluación de seguimiento (EDS) permite luego que finalicen los tiempos establecidos para la misma, que el docente verifique la resolución que los alumnos realizaron en primera instancia y que no cambien o modificaron la misma en la otra fase de la actividad.

En la segunda fase más experimental e interactiva el docente presenta a los estudiantes el MF, los estudiantes interactúan con este y vinculan lo expresado en el enunciado del problema con este.

El MF diseñado específicamente para el problema indicado permite que ellos analicen, experimenten y verifiquen en esta instancia alguno de los aspectos que se solicitaban en la EDS.

El docente comienza a realizar preguntas especificas a los alumnos sobre diferentes situaciones hipotéticas que se les plantean y analizan los resultados obtenidos en relación con los principios teóricos estudiados y aplicados en el problema según lo solicitado en el enunciado de este.

En este caso particular en donde se consideró analizar las leyes de Newton aplicada a dos bloques unidos por una cuerda, que pasaba por una polea y de los cuales uno estaba suspendido ($m_1$) y el otro sobre un plano inclinado ($m_2$) como podemos observar en la figura 1.

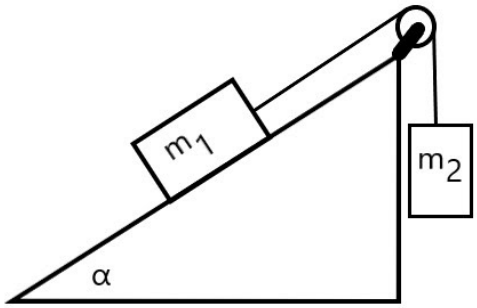



*Figura 1: Diagrama del enunciado planteado en el problema a los alumnos.*

El docente interpeló a los estudiantes con diferentes preguntas como: ¿hacia dónde se desplazan los bloques?, ¿El ángulo de inclinación del plano inclinado tiene alguna incidencia en la aceleración que adquieren los bloques?, si existe fricción entre el bloque y el plano inclinado, ¿cómo calculamos si el coeficiente de fricción es estático o dinámico?...

El objetivo de esta parte del proceso consistió en que los alumnos interpreten en el MF las diferentes situaciones que les planteo el docente y verifiquen si lo que ellos consideraban o que poseían como un conocimiento previo del tema se cumplía o coincidía con lo observado en la representación que realizaban en esta otra etapa.

De este análisis ellos debían verificar si lo que habían interpretado y resuelto en el problema correspondía con lo que el docente desarrollo en la pizarra para cada pregunta en particular. De esta manera el docente podía comparar y evaluar los resultados a los que habían llegado inicialmente los estudiantes (actividad en archivo Pdf cargado en el campus virtual).

Esta metodología de resolver el problema con la participación de toda la clase y generando intercambios de opinión entre ellos permitió además que desarrollaran competencias que en las clases tradicionalmente expositivas no se logran alcanzar.

En la etapa final del proceso, se aplicó una encuesta de opinión dirigida a la totalidad del estudiantado, con el propósito de recabar información cualitativa sobre la experiencia. Desde esta perspectiva, se analizó cómo les estudiantes interpretan o valoran los beneficios de desarrollar la clase mediante una metodología alternativa. La encuesta utilizada ha sido implementada en años anteriores y cuenta con validación por parte de expertos en la temática. A través de este instrumento, se evaluaron aspectos tales como la motivación, el nivel de comprensión alcanzado y la percepción de utilidad de la actividad práctica. Los resultados obtenidos constituirán un insumo relevante para valorar la efectividad de la estrategia didáctica implementada.

En otro nivel del desarrollo se evalúan las competencias tecnológicas como es la de “CG1: Identificar, formular y resolver problemas de Ingeniería” y las competencias políticas, sociales y actitudinales como la de “CG10: Aprender en forma continua y autónoma” y “CG7: Comunicarse con efectividad” que los estudiantes deben desarrollar en este nivel inicial de su formación ingenieril.

Un objetivo de la enseñanza de la Física es proporcionar a los estudiantes las condiciones favorables para adquirir un conjunto de conceptos necesarios para interpretar fenómenos naturales y resolver problemas. El nivel de comprensión de esos conceptos y la extensión de su aplicabilidad depende mucho de los elementos que emplea el docente para desarrollar la clase y alcanzar los objetivos establecidos.

Muchos de los profesores están interesados en la mejora continua de la enseñanza y de los resultados de aprendizaje de sus estudiantes, y consideran la información que recogen de las evaluaciones como parte de una retroalimentación formativa para contribuir a mejorar los aprendizajes de los alumnos. También existen muchos profesores que no acostumbran a utilizar los resultados de las evaluaciones en sus propias clases para reflexionar sobre los aprendizajes alcanzados y los pendientes, ni sobre sus prácticas de enseñanza.

Entre las razones por las cuales no se utilizan los datos de las evaluaciones, Smith (2008) menciona la falta de motivación de los docentes para mejorar sus clases, que los lleva a no legitimar los datos. Este autor se refiere entonces a una cuestión actitudinal. Otro motivo que enuncia es que los profesores consideran que los datos de las evaluaciones tienen un propósito sumativo: solo brindan información de los aprendizajes; en consecuencia, no los valoran para mejorar la enseñanza.

Consideramos en este trabajo que son muy importantes aspectos como la motivación, inculcar la investigación y la devolución que le realizamos a nuestros alumnos sobre las actividades que estos desarrollan en clases.

### 2.1 Resultado de la encuesta.

La encuesta que consistía en 25 preguntas se realizó a todos los alumnos de la clase de Física I del curso de Ingeniería Industrial una vez finalizada la actividad. El 31% de los estudiantes indicó que tiene dificultades para interpretar los enunciados de los problemas, además no le quedan claros cuales son los conceptos que deben emplear y un 44% manifestó que no tiene ninguna dificultad al hacerlo. Un 94% puede reconocer e interpretar los gráficos sin dificultad, pero manifiestan además que el 86% tiene dificultades para representar un gráfico o dibujo del enunciado.

El 47% prefiere que la representación gráfica del problema la realice el docente mientras que al 42% le es indistinto hacerlo el estudiante o el docente.

En lo que respecta a la representación de los diagramas de cuerpo libre en la resolución de los problemas el 67% tiene dificultades para generar esta representación, mientras que un 86% sigue el procedimiento habitual de colocar en primera instancia los datos e incógnitas establecidos en el enunciado.

Cuando resuelven el problema y van desarrollando las diferentes etapas de este, un 69% reemplaza los valores de las variables en las ecuaciones para verificar si las unidades del resultado son correctas y un 86% emplea cifras significativas para indicar los resultados al finalizar los cálculos.

Un porcentaje del 8% no emplea resúmenes de fórmulas al resolver los problemas, un 31% siempre y el 61% en algunas ocasiones. El 72% de los estudiantes estudia solo y al preguntarles cuanto tiempo dedican semanalmente a la resolución de problemas las repuestas fueron en un porcentaje muy inferior al esperado que condice con los resultados que se obtienen anualmente. (Tabla 1)

*Tabla 1: Porcentaje de horas dedicadas al estudio semanalmente a la asignatura Física I (fuente propia)*

| Cantidad de hs. | 1 hs. | 2 hs. | 3 y 4 hs. | Mas de 4 hs. |
|---|---|---|---|---|
| % Teoría | 42% | 50% | 5% | 3% |
| % Practica | 8% | 36% | 39% | 17% |

En cuanto al empleo del MF en la resolución de la EDS a un 33% le pareció más interesante emplearlos, un 61% de los estudiantes indicaron que el MF les permitió comprender mucho mejor el problema y a un 92% les permitió interpretar de una mejor manera la representación gráfica del problema.

Se emplearon además dos preguntas abiertas con el objeto de recabar más información de la opinión de los estudiantes que debido a la complejidad de su análisis, son utilizadas con poca frecuencia, o cuando se utilizan, simplemente se dejan como parte en el cuestionario, pero no se analizan las respuestas a este tipo de preguntas. Dichas respuestas constituyen una prolongación indispensable de los cuestionarios, cuando se trata de explorar y profundizar sobre un tema complejo o poco conocido. (William Arley Rincón Gómez 2014)

El análisis de datos textuales son una alternativa a los métodos tradicionales de análisis de grandes masas de datos como una motivación al estudio de técnicas que permitan analizar datos de tipo textual.

Las preguntas abiertas que se emplearon fueron:

- Primera pregunta abierta (1°P) ¿Cuál es la dificultad que con mayor frecuencia se le presenta en esta asignatura?
- Segunda pregunta abierta (2°P) ¿Que considera usted que le puede facilitar la comprensión de la asignatura?

Con el objeto de valorar cada una de las repuestas y darles el peso correspondiente se realizó un análisis en donde se agruparon las mismas teniendo en cuenta similitudes entre los temas que referenciaban los alumnos y de esta manera se obtuvieron para la 1°P los conceptos de codificación siguientes: *formulas, temas de teoría, clases de práctica, dedicación y restantes*. Siendo el concepto restante aquellas repuestas en donde no coincidían con la mayoría de las codificaciones establecidas. En la figura 2 se pueden observar los porcentajes obtenidos como resultado del análisis efectuado.

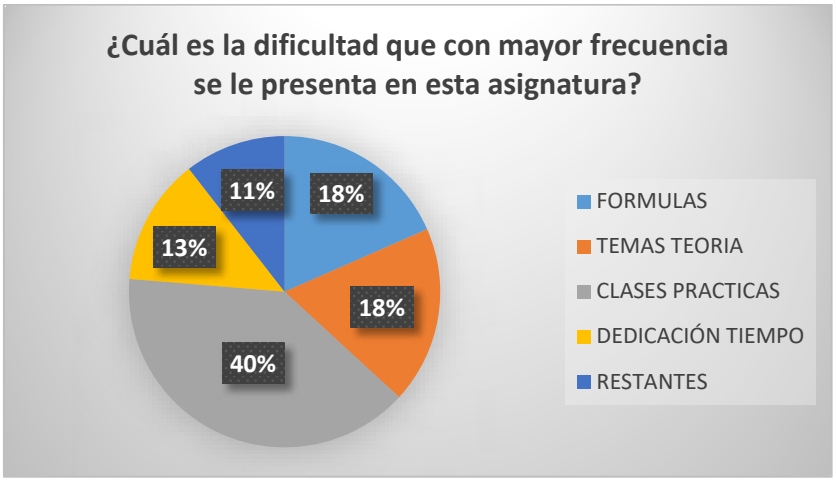



*Figura 2: Resultados de la pregunta abierta N°18. (Fuente propia)*

En este gráfico podemos observar que el 40% presenta algún comentario referente a las clases prácticas como ser en la organización de esta, de los materiales de estudio, de la vinculación con los Trabajos Prácticos, de la relación entre la teoría y la práctica. Tanto el empleo de resúmenes de fórmulas como la dificultad de interpretar cuál de ellas utilizar ocupo el 18% el mismo porcentaje de los que indicaron alguna observación hacia las clases de teorías o los contenidos y desarrollo de estas.

Un 13% de los estudiantes consultados manifestaron tener dificultades para organizarse con los tiempos de estudio, falta de tiempo para estudiar la teoría para aplicar la práctica.

En la 2°P donde se consultó a los estudiantes sobre qué elementos o metodologías podrían facilitar la comprensión de la asignatura se obtuvieron los siguientes resultados que se describen en la figura 2. En estas repuestas siguiendo una codificación similar a la anterior se generaron los siguientes conceptos: *modelos físicos, videos, clases teóricas, clases prácticas y organización*.

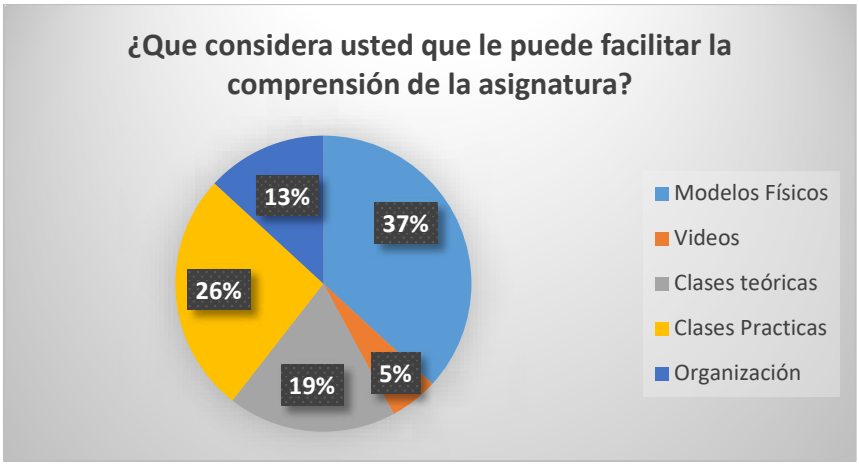



*Figura 3: Resultados de la pregunta N°19. Fuente propia*

El uso de MF para apoyo de las clases tuvo la mayor aceptación el 37%, el uso de videos solamente un 5%, un mayor énfasis en aspectos sobre la duración, materiales de las clases prácticas alcanzo el 26%, mientras que las clases teóricas mantuvieron un porcentaje similar al de la 1°P analizada 19%. Sigue existiendo la organización como un factor que el alumno percibe en sus dificultades para el desarrollo de la asignatura 13%.

En cuanto a la pregunta “si estarían dispuestos a participar en algún proyecto de investigación en donde se diseñen MF para implementar en las clases” solamente un 31% le interesa, al 56% le interesa, pero indican que no tienen tiempo y a un porcentaje muy bajo del 14% no está dentro de sus prioridades.

En lo referente a “Que aporte tiene sobre el MF empleado, o que le mejoraría al mismo (en cuanto a materiales, formas, temas, etc.) el 95 % dijo que estaba muy bien realizado y el porcentaje restante indicó que le mejoraría detalles menores como los colores o el acabado de las superficies para disminuir el coeficiente de fricción.

## 3. CONCLUSIONES.

El análisis de los resultados obtenidos mediante la encuesta aplicada a los estudiantes tras finalizar la actividad permite identificar con claridad diversas problemáticas vinculadas a la comprensión y resolución de problemas en la asignatura evaluada. En primer lugar, se evidencian dificultades significativas en la interpretación de enunciados y la identificación de conceptos relevantes, así como en la representación gráfica y la elaboración de diagramas de cuerpo libre, aspectos fundamentales en el abordaje de problemas de esta índole. Aunque una mayoría logra interpretar correctamente los gráficos provistos, la capacidad para generarlos sigue siendo limitada, lo cual afecta el desarrollo autónomo del razonamiento físico-matemático.

Asimismo, se destaca una preferencia notable por parte del alumnado hacía que el docente realice la representación gráfica, lo que sugiere una dependencia que puede limitar el desarrollo de habilidades propias. En cuanto a las estrategias de resolución, la mayoría de los estudiantes sigue procedimientos formales correctos, como la identificación de datos e incógnitas y el uso de cifras significativas, lo que indica una apropiación parcial de metodologías técnicas, aunque persisten falencias en la aplicación autónoma y reflexiva de las mismas.

Los resultados también evidencian un bajo nivel de dedicación horaria al estudio, especialmente en la práctica, lo cual guarda relación directa con las dificultades expresadas. El análisis de las preguntas abiertas permitió ampliar la comprensión de estas problemáticas, destacándose la relevancia de aspectos organizativos, el uso de recursos como modelos físicos y la necesidad de una mejor articulación entre teoría y práctica.

Finalmente, se concluye que para mejorar el aprendizaje en esta asignatura es indispensable implementar estrategias didácticas más activas y diversificadas, que incluyan mayor énfasis en la representación gráfica, el uso de modelos físicos como facilitadores del pensamiento abstracto, y una reorganización pedagógica que permita a los estudiantes integrar eficazmente los contenidos teóricos

y prácticos. Estas acciones deberían estar acompañadas de un trabajo sistemático en habilidades metacognitivas y de gestión del tiempo, claves para la mejora del rendimiento académico.

## 4. REFERENCIAS.


Pozo, J. I., & Gómez Crespo, M. A. (1998). Aprender y enseñar ciencia: Del conocimiento cotidiano al conocimiento científico. Morata.

Real Academia Española. (2024). Problema. En Diccionario de la lengua española (23.ª ed.). https://dle.rae.es/problema.

Real Academia Española. (2024). Modelo. En Diccionario de la lengua española (23.ª ed.).https://tesauros.cultura.gob.es/tesauros/bienesculturales/1181350#c-914643367

Real Academia Española. (2024). Maqueta. En Diccionario de la lengua española (23.ª ed.).https://tesauros.cultura.gob.es/tesauros/bienesculturales/1172131.html?utm_source=chatgpt.com

Tobón, S. (2013). Educación basada en competencias: Pensamiento complejo, currículo, didáctica y evaluación. Ecoe Ediciones.

Medina Mosquera, C. A. (2019). Diseño, construcción y prueba de dos modelos físicos de experimentación activa para la enseñanza aprendizaje de algunos fenómenos de Física. Universidad Nacional de Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76745

Rodríguez, M., & Pérez, L. (2020). Didáctica de las ciencias básicas: Enfoques y estrategias para la educación superior. Editorial Académica Universitaria.

Gil-Pérez, D., et al. (2002). Didáctica de las ciencias en la educación secundaria. Horsori.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2014). Física para ciencias e ingeniería (9.ª ed.). Cengage Learning.

Wankat, P. C., & Oreovicz, F. S. (2015). Teaching Engineering (2nd ed.). Purdue University Press.

Smith, C. (2008): “Building effectiveness in teaching through targeted evaluation and response: conecting evaluation to teaching improvement in higher education”, Assessment and Evaluation in Higher Education, 33(5): 517-533.

William Arley Rincón Gómez 2014. Preguntas abiertas en encuestas ¿cómo realizar su análisis? Universidad Santo Tomás. Colombia. ISSN 2027-3355, ISSN-e 2339-3076, Vol. 7, Nº. 2, 2014, págs. 25-43

Gon Fabian Rodrigo Agosta, Carlos Gutiérrez, Oscar Greco (2024). “La implementación de Modelos Físicos para la resolución de problemas de Física, una experiencia en la FRSF-UTN”. Publicación en X Jornadas Nacionales y VI Latinoamericanas de Ingreso y Permanencia en Carreras Científico-Tecnológicas - IPECyT 2024 | AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN). Pág. 173. DOI: https://doi.org/10.33414/ajea.1797.2025.

# UNIENDO INVESTIGACIÓN Y EDUCACIÓN: DESARROLLO DE PROTOTIPOS DE SOFTWARE

Castellini, María Alejandra[(1)]; Almanza, Israel[(1)];
Belderrain, Carmen [(2)]; Bergiante, Níssia[(3)]

*(1) Facultad de Ingeniería y Tecnología Informática, Universidad de Belgrano, Argentina*
*(2) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil (3) Universidad Federal Fluminense, Brasil*
alejandra.castellini@comunidad.ub.edu.ar, israel.almanza@comunidad.ub.edu.ar,
carmen.beld@gmail.com, nissiabergiante@id.uff.br

**RESUMEN**

Esta propuesta educativa está enmarcada en el Proyecto de Investigación "Aportes multimetodológicos a procesos de gestión en problemas reales" de la Universidad de Belgrano (UB), cuyos objetivos son: 1) la creación de herramientas informáticas orientadas a métodos de Investigación Operativa *soft*, 2) la formación de alumnos de las carreras de Ingeniería Industrial y de la Tecnicatura de Programación de Computadoras (TPC), ambas de la UB y 3) la aplicación de los prototipos de software en casos reales. El equipo de investigación está integrado por tres docentes-investigadoras, especialistas en Investigación Operativa (IO) pertenecientes a la UB, al Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) y a la Universidad Federal Fluminense (UFF) respectivamente y un Técnico en Programación de Computadoras (TPC), egresado UB. Los estudiantes de la carrera de TPC de la UB desarrollaron su Trabajo Social Profesional (proyecto final), guiados por los integrantes del proyecto, a través de un plan de actividades basado en la capacitación y en la asistencia para lograr un prototipo de *software* del método de IO *soft: Strategic Choice Analysis* (SCA), incorporando todos sus modos funcionales: modelado, diseño, comparación y selección. Posteriormente el TPC, integrante del proyecto, mejoró la funcionalidad y la estabilidad del prototipo. La aplicación fue desarrollada con una arquitectura moderna y escalable, logrando una interfaz intuitiva y accesible, apoyada en bases de datos y funcionalidades en tiempo real para una experiencia dinámica. La versión disponible en página web, fue probada por las investigadoras con los alumnos de posgrado del ITA y de la UFF en diferentes problemas académicos con buenos resultados. Este enfoque de trabajo ha resultado especialmente desafiante como metodología educativa para el cumplimiento de los objetivos del proyecto, através de la interacción de tres Universidades de dos países, proyectando continuar un camino similar con otras metodologías IO *soft*.

**Palabras Claves:** Investigación Operativa *Soft*, *Strategic Choice Approach,* Capacitación, Prototipo de *Software*

**ABSTRACT**

This educational proposal is part of the research project "Multimethodological Contributions to Management Processes in Real-World Problems" at the University of Belgrano (UB). Its objectives are: 1) the creation of software tools oriented toward soft Operations Research methods; 2) the training of students in the Industrial Engineering and Computer Programming (TPC) programs, both at the UB; and 3) the application of software prototypes in real-world cases. The research team is composed of three professor-researchers, Operations Research (OR) specialists from UB, Technological Institute of Aeronautics (ITA), and the Fluminense Federal University (UFF), respectively, and a Computer Programming Technician (CPT), a UB graduate. Students in the UB TPC program developed their Professional Social Work (final project), guided by project members, through a plan of activities based on training and assistance to create a software prototype of the soft OR method: Strategic Choice Analysis (SCA), incorporating all its functional modes: modeling, design, comparison, and selection.CPT, a project member, subsequently improved the functionality and stability of the prototype. The application was developed with a modern and scalable architecture, achieving an intuitive and accessible interface, supported by databases and real-time functionalities for a dynamic experience.The version available on the website was tested by the researchers with postgraduate students from ITA and UFF on different academic problems with good results.This work approach has proven especially challenging as an educational methodology for meeting the project objectives, through the interaction of three universities from two countries. The project plans to continue a similar path with other soft OR methodologies.

**Keywords:** Soft Operation Research**,** Strategic Choice Approach,Training, Software Prototype

## 1. INTRODUCCIÓN.

La Investigación Operativa (IO), basada en metodología científica, contribuye a resolver problemas, ofreciendo una gama de métodos y técnicas que asisten en la toma de decisiones en procesos de gestión.

La IO más difundida es la denominada *hard* (dura) que involucra a los modelos matemáticos de optimización determinísticos y probabilísticos, tales como Programación lineal, Programación Dinámica, Modelos de Inventarios, Líneas de Espera, y otros.

Estos modelos, cuando se aplican a situaciones reales, requieren acuerdos previos de los involucrados en las organizaciones, en cuanto a prioridades, objetivos, plazos, lo cual no es trivial cuando las problemáticas son complejas.

Es en ese entorno donde cada vez tienen mayor aplicación las metodologías *soft* (suave) de IO, que se caracterizan por estructurar los problemas mediante la participación de los *stakeholders* (involucrados) considerando sus diferentes perspectivas.

Los Métodos de Estructuración de Problemas (*Problem Structuring Methods* – PSM) son una familia de métodos participativos e interactivos pertenecientes a la IO *soft*.

Los PSM permiten explorar una situación problemática confusa desde diversas perspectivas, de modo que los participantes desarrollen una apreciación global de la situación y lleguen a un consentimiento mutuo sobre la definición del problema. Mediante el modelado y la facilitación de grupos, se pretende fomentar la participación activa de las partes interesadas en el problema, apoyar la negociación entre participantes con diferentes puntos de vista, generar aprendizaje, identificar mejoras y compromiso con la acción (MINGERS y ROSENHEAD, 2004).

Las Multimetodogías (MM) combinan diferentes métodos de IO *soft* (no matemáticos), o parte de ellos, y/o de IO *hard* (matemáticos), dentro de una intervención social particular, adquiriendo relevancia en diferentes aplicaciones (FRANÇOZO & BELDERRAIN, 2022). Son aplicables en organizaciones a fin de mejorar sus procesos de gestión. (CASTELLINI & PAUCAR-CAERES, 2019, 2022).

Su importancia se fundamenta en que: 1) las situaciones problemáticas reales son multidimensionales, 2) una intervención es un proceso llevado a cabo en etapas que tienen diferentes tareas y dificultades, que pueden ser mejor abordadas por diferentes métodos, 3) la combinación de métodos puede brindar nuevos puntos de vista y hacer más confiables los resultados.

En el marco del Proyecto de Investigación “Aportes multimetodológicos a procesos de gestión en problemas reales” se proponen lo siguientes objetivos: La aplicación de multimetodologías (MM), el desarrollo de prototipos de softwares que aporten a las MM y la formación de RRHH.

Considerando que existen numerosos y eficaces *softwares* para los métodos IO *hard*, no así en la IO *soft* y que una de las metodologías más difundidas de este paradigma es el método *Strategic Choice Approach* (SCA), presentamos en este trabajo el proceso educativo implementado para lograr un prototipo de *software* para este método, desarrollado por alumnos de la TPC de la UB, y su posterior prueba por alumnos de posgrado del ITA con la asistencia de los integrantes del proyecto, docentes investigadores de carreras de Ingeniería de Argentina y Brasil

### 1.1. *Strategic Choice Approach* (SCA).

Se basa en un proceso dinámico compuesto por cuatro modos de funcionamiento: Modelización, Diseño, Comparación y Elección (FRIEND, 2001). Cada modo contiene un conjunto de conceptos y técnicas asociados.

a) Modo de Modelado: para identificar la estructura del conjunto de áreas de decisión que deben abordarse. El concepto de «área de decisión» es el punto central del modo de modelización. Un área de decisión representa un área de elección en la que los responsables de la toma de decisiones expresan opciones de cursos de decisión alternativos que pueden adoptarse en el presente o en el futuro.

b) Modo de Diseño: para identificar las posibles líneas de actuación, teniendo en cuenta la visión actual del problema, las opciones disponibles y las restricciones del proyecto. El resultado de este modo son las alternativas generadas;

c) Modo de Comparación: los responsables de la toma de decisiones debaten la evaluación de las consecuencias a partir de criterios denominados áreas de comparación;

d) Modo de Selección: en este modo, el aspecto temporal se vuelve central, lo que requiere la revisión de las estrategias para gestionar las incertidumbres.

El proceso del SCA puede aplicarse en cualquier secuencia, en una variedad de direcciones de movimiento entre un modo de operación y otro.

Se representan gráficamente en la Fig. 1

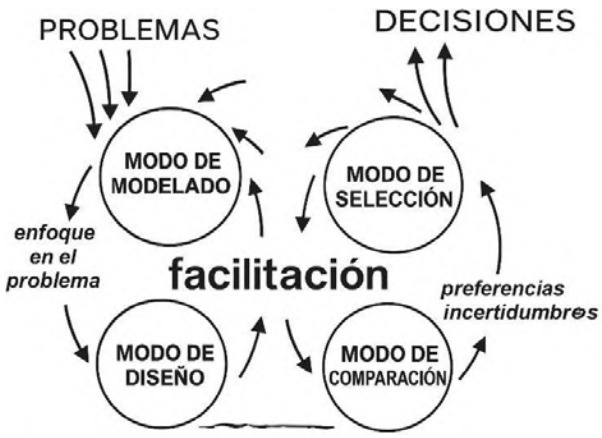



*Figura 1. Esquema Método SCA*

### *1.2.* Desarrollo del prototipo de software.

En cuanto al desarrollo del prototipo de software, los alumnos de la TPC obtuvieron 'modelos de sistemas de soporte de decisiones' o DSS. A diferencia de los sistemas de información administrativa (MIS) destinados al almacenamiento, consulta y procesamiento de información de una organización, y los de la inteligencia artificial (AI) que buscan abordar a una conclusión lógica y proponer soluciones, los DSS, en un espectro intermedio, buscan dar respaldo a la toma de decisiones, siendo como los autores lo definen 'sistemas enfocados en la inteligencia de negocios.' Estos sistemas permiten que determinados grupos resuelvan problemas interactuando con el software y un 'facilitador', en este caso rol del investigador.

Se distinguen dos roles claros: El 'programador' encargado de realizar el desarrollo y el 'usuario' o 'cliente' que serán quienes consuman dicho producto de software.

### 1.3. Formación de RRHH.

Se dotó a dos equipos de alumnos (los 'programadores') de conocimientos y habilidades relacionadas con las metodologías SCA y *Soft System Methodology* (SSM) de IO *soft*, a través de la capacitación en dichos conceptos proponiéndoles el desafío de desarrollar prototipos de softwares.

El trabajo se orientó a realizar contribuciones metodológicas y de desarrollo de *software*, proponiendo prácticas que pueden mejorar el diseño de las intervenciones multimetodológicas en organizaciones.

La Hipótesis principal es que la dinámica de la enseñanza universitaria y la organizacional requieren de la mejora continua de las metodologías de gestión, así como la incorporación y capacitación de nuevas aplicaciones que impacten positivamente en dicha actividad, para lo cual planteamos la siguiente metodología.

## 2. METODOLOGIA: PROPUESTA EDUCATIVA

### 2.1. Investigación- Acción.

El desarrollo de esta propuesta comenzó en abril de 2024, continuando en la actualidad.

La Metodología en ejecución para el objetivo del desarrollo del prototipo de *software* se fundamentó en la de Investigación-acción, basada en las siguientes actividades:

- Intercambio de conocimientos entre los investigadores integrantes del proyecto, considerando los diferentes saberes en Investigación Operativa y en desarrollos de softwares.
- Convocatoria a alumnos de la carrera de Tecnicatura en Programación de Computadoras de la UB que desarrollaron su actividad en el marco del requisito Trabajo Social Profesional (TSP) que tiene una dedicación de 300 horas y con el cual finalizan su carrera.
- Capacitación en PSM. Mediante reuniones virtuales entre los integrantes del proyecto y los alumnos, a quienes se les transmitieron los lineamientos generales del proyecto, una introducción a la IO en general y las metodologías SSM y SCA, del paradigma IO *soft*, en particular. Se organizaron reuniones periódicas a través de la plataforma *meets* para revisar, corregir y ajustar el software desarrollado hasta cada momento, asegurando que el progreso estuviera alineado con los objetivos del proyecto y permitiendo iterar sobre el diseño en función del feedback recibido.

Estas reuniones incluyeron 6 sesiones de 2 horas cada una durante todo el trayecto de desarrollo del software, donde se profundizó en aspectos técnicos y conceptuales del proyecto, aportando material bibliográfico, esenciales para comprender los fundamentos teóricos de ambos métodos y su aplicación.

A lo largo del proyecto, se mantuvo una comunicación constante y productiva con los alumnos, lo que permitió acordar diseños y funcionalidades clave. Esto fue especialmente relevante, considerando que parte del trabajo se concentró hacia el final del año 2024, lo que requirió organización y esfuerzo adicional para cumplir con los tiempos establecidos.

Considerando que esta era la primera experiencia de los alumnos trabajando con el Método SCA, la capacitación y documentación proporcionada les permitió aprender los principios básicos del enfoque y su aplicación. Así fueron desarrollando un software inicial de los cuatro modos del método.

Los alumnos trabajaron en equipo utilizando un enfoque iterativo, organizando el desarrollo en *sprints*, cada uno con objetivos y entregables definidos. Este modelo permitió dividir el proyecto en etapas manejables, garantizando avances constantes y la entrega de resultados funcionales al final de cada sprint. La colaboración activa y la autoorganización entre los integrantes del equipo fueron esenciales para cumplir los plazos establecidos.

Desarrollaron una primera versión del software basada en los requerimientos del Método SCA, la que permite futuras ampliaciones y modificaciones para completar las funcionalidades y realizar el despliegue en etapas posteriores.

Durante el proceso, adquirieron conocimientos en nuevos lenguajes de programación como HTML, CSS y JavaScript. Se reforzaron los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, incluyendo: bases de datos SQL, aplicación de consultas y manejo eficiente de datos. Diseño y desarrollo de *endpoints* para la comunicación entre cliente y servidor, asegurando un manejo adecuado de las solicitudes (*requests*) y respuestas. Desarrollo web: Implementación de las funcionalidades necesarias para cumplir con los requerimientos del proyecto.

### 2.2. Desarrollo del Software.

#### 2.2.1. Primera Etapa- Período 2024.

- Desarrollo Front-end: Se completó la configuración de rutas, así como la creación de formularios dinámicos y el diseño de componentes esenciales para la interfaz de usuario, asegurando una experiencia visual y coherente con los objetivos del proyecto. Desarrollo Back-end: se desarrollaron las funcionalidades necesarias para completar con el trabajo (Hernández Bejarno, M., 2020)
- Desarrollo de los 2 primeros modos del método SCA: Modelado y Diseño. En donde podrán crear

las áreas de decisión, el gráfico de nodos y la selección de áreas importantes. En cuanto al modo de diseño se podrán añadir las opciones de esas áreas y se seleccionan las posibles alternativas.

- Desarrollo de los 2 últimos modos del método SCA: Modo comparación: Permite comparar las alternativas generadas en el árbol de opciones. La primera tabla de este modo le permite al facilitador asignarle a cada área de comparación un parámetro como identificativo (emoji) para que este sea representativo de un valor. También permite asignar y modificar el orden de importancia de las áreas de comparación, modificar el nombre del rótulo para que sea más representativo y eliminar o agregar un área de comparación. En la siguiente ventana, se dispone de una tabla que permite al facilitador agregar o restar valor por cada área de comparación, asignándole diferentes valores a cada opción de decisión. En la última ventana de este modo, se permite al facilitador definir puntuaciones mínimas por cada área, lo que permitirá reducir la cantidad de alternativas y que permanezcan las más significativas. Modo de Selección: En este modo, el facilitador o usuario puede comparar las alternativas disponibles, eligiendo la opción que tenga el mayor valor según los criterios de puntuación previamente definidos.

El sistema presenta una tabla donde se muestran los valores totales de cada opción de decisión, permitiendo al facilitador o usuario identificar fácilmente la alternativa más significativa. La selección se realiza al observar cuál de las opciones tiene el mayor valor en cada caso.

Se presentaron desafíos técnicos por inconvenientes ya que se excedieron los recursos disponibles en el plan gratuito y porque la base de datos, inicialmente configurada en Hostinger utilizando SQL, presentó dificultades debido a caídas frecuentes del servicio. Como resultado se decidió migrar a PostgreSQL y hospedarla en Aiven para garantizar una mayor estabilidad y disponibilidad (Aranguri et al. 2021).

### 2.2.2. Segunda Etapa - Período 2025.

Desde marzo 2025 hasta la actualidad, se desarrollaron las siguientes actividades por parte del investigador, integrante del proyecto UB, los alumnos de posgrado del ITA y las docentes-investigadoras.
Durante el presente año y en base a lo realizado por el equipo el año 2024, el técnico en informática e integrante del equipo de investigación del proyecto, con el fin de escalar, optimizar y enriquecer la experiencia de usuario, continuó con las siguientes actividades:

- Escalabilidad multiusuario y multiproyecto: Se amplió la arquitectura de la aplicación, permitiendo que múltiples usuarios puedan gestionar de manera simultánea diferentes proyectos sin interferencias, garantizando así un uso más flexible y adaptado a entornos colaborativos.
- Internacionalización (i18n): Se integró un sistema de configuración multilenguaje con soporte para español, inglés y portugués, permitiendo que la aplicación pueda ser utilizada en diferentes contextos lingüísticos y culturales.
- Implementación de un panel de control (*dashboard)* centralizado: Para mejorar la administración de la información y optimizar la presentación de los datos de manera visual e intuitiva.
- Accesos directos y pestañas de navegación: Se incorporaron accesos directos a funcionalidades clave y pestañas que representan los distintos módulos, facilitando la comprensión y el acceso eficiente a los datos.
- Menú desplegable de configuración (*dropdown*): Se integró un menú desplegable que permite al usuario navegar entre proyectos activos y realizar su eliminación, mejorando la usabilidad y el control sobre los proyectos.
- Sumatoria en modo de selección: Se añadió una funcionalidad que muestra la sumatoria en el modo de selección, con el fin de hacer más práctica y visible la información para el usuario durante el proceso de decisión.
- Visualización de caminos alternativos: Se implementó una representación gráfica de los posibles caminos alternativos de selección, lo cual facilita la recordación y comprensión del proceso por parte del usuario.
- Configuración avanzada de puntuaciones mínimas: Se modificó el sistema de puntuaciones para permitir la definición de límites mínimos, máximos y rangos de valores, ofreciendo mayor flexibilidad en los criterios de evaluación.
- Pantallas de validación de alternativas: Se desarrollaron dos vistas diferenciadas que permiten al usuario identificar alternativas válidas e inválidas, mostrando de manera clara cuáles cumplen y

cuáles no cumplen con los requisitos establecidos en el proceso de selección.

- Sistema de notificaciones al usuario: Se implementó un mecanismo de notificaciones que informa al usuario sobre las acciones realizadas dentro de la aplicación, brindando retroalimentación inmediata y mejorando la transparencia en los procesos ejecutados.
- Gestión de carga y bloqueo de acciones durante operaciones críticas: Se incorporó un sistema de indicadores de carga (*loading*) para los procesos de consulta y guardado en la base de datos. Durante estas operaciones, la interfaz bloquea la ejecución de otras acciones, evitando inconsistencias y garantizando que los datos se almacenen de manera correcta y segura.
- Se realizó la migración de la base de datos hacia Supabase, con el objetivo de habilitar un manejo de datos en tiempo real, facilitar el despliegue de la aplicación y disponer de funcionalidades avanzadas necesarias para las nuevas implementaciones (Otálora-Luna, J. E. et al. 2018), (Trejos 2017), (Trujillo Casañola, Y. 2015).

### 2.2.3. Flujo del Proceso - Guía Visual.

En las figuras 2 a 9 se presentan capturas de pantallas representativas de los diferentes modos del método SCA, extraídas del flujo completo del proceso (una vez hecho el login correctamente) de un caso real de selección de empleo por parte de un profesional de ingeniería, desarrollado en el ITA, Brasil

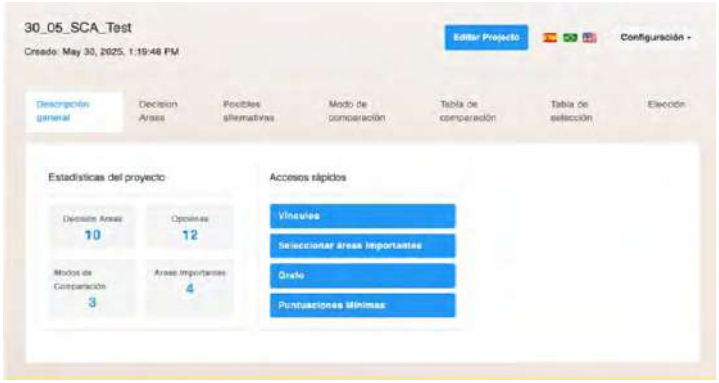



*Figura 2 Dashboard principal con estadísticas del proyecto y opciones de gestión*




*Figura 3 Modo de Modelización: Interfaz de las áreas de decisión creadas*




*Figura 4 Modo de Modelización: Visualización del grafo e interacción del mismo*




*Figura 5 Modo de Diseño: C*reación de opciones dentro de cada área de decisión

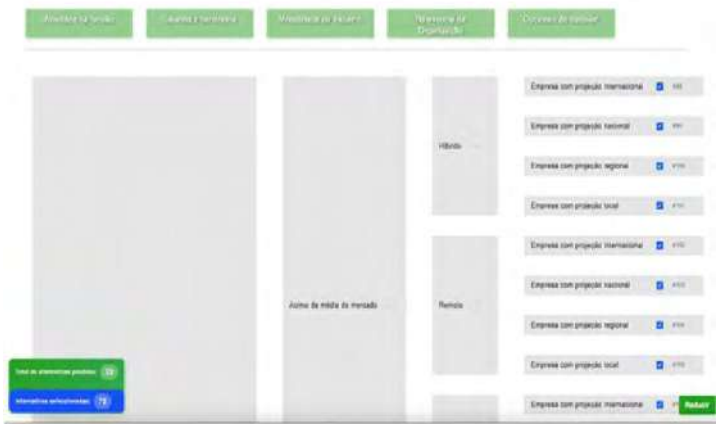


*Figura 6 Modo de Diseño: Selección gráfica de las posibles alternativas*




*Figura7 Modo de Comparación: Interfaz para crear las nuevas áreas en el modo de comparación*




*Figura 8 Modo de Comparación: Matriz de Comparación*




*Figura 9 Modo de Selección Visualización de alternativas. Resultado final con las alternativas seleccionadas y sus puntuaciones*

## 3. RESULTADOS.

### 3.1. Prototipo de Software desarrollado en UB.

Las mejoras implementadas en la aplicación SCA dieron como resultado un sistema robusto, usable y adaptable. La plataforma soporta de forma eficiente la gestión de múltiples usuarios y proyectos de manera simultánea, asegurando un entorno colaborativo sin pérdida de rendimiento. La incorporación del *dashboard* centralizado y los accesos rápidos permitió una reducción en los tiempos de navegación y una mayor claridad en la visualización de los datos, mejorando la eficiencia del usuario en el uso de la herramienta.

En términos de confiabilidad, la implementación de notificaciones y el manejo de cargas con bloqueo de acciones críticas garantizó que los procesos de guardado y consulta se realicen de manera segura y consistente, evitando errores de duplicación o pérdida de datos. Asimismo, las nuevas funcionalidades de sumatoria, visualización de caminos alternativos y validación de alternativas válidas e inválidas fortalecieron la capacidad de análisis y toma de decisiones dentro de la aplicación.

Finalmente, la migración a Supabase permitió obtener datos en tiempo real, mejorar la escalabilidad del sistema y habilitar nuevas funcionalidades complejas, consolidando la aplicación como una herramienta preparada para despliegues más exigentes y con potencial de ser aplicada tanto en el ámbito académico como en contextos profesionales.

### 3.2. Aplicaciones del prototipo desarrolladas en ITA-UFF.

Este desarrollo fue experimentado por estudiantes de posgrado en dos universidades distintas: el Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) y la Universidad Federal Fluminense (UFF). Ambas son instituciones de referencia en Brasil, aunque se encuentran en diferentes estados: el ITA está localizado en São Paulo y la UFF en Río de Janeiro.

La asignatura cursada por los estudiantes en ambas universidades fue la misma: Métodos de Estructuración de Problemas (*Problem Structuring Methods*, PSM). Esta disciplina busca proporcionar herramientas para enfrentar situaciones complejas de toma de decisiones, desarrollando la capacidad de los estudiantes para analizar, estructurar y proponer soluciones a problemas reales de alta complejidad.

En la primera cohorte, correspondiente al ITA, participaron 42 estudiantes matriculados, organizados en 14 grupos de tres integrantes cada uno. En la segunda cohorte, de la UFF, participaron 24 estudiantes, también distribuidos en grupos de tres. Esta configuración buscó fomentar el trabajo colaborativo y la diversidad de perspectivas en el análisis de problemas.

El diseño y planificación de la aplicación en ambas universidades siguió los mismos pasos, garantizando la comparabilidad de los resultados:

- Introducción conceptual: Se impartió contenido teórico sobre el enfoque del *Strategic Choice Approach* (SCA), recorriendo de manera sistemática todos sus modos. Esta etapa fue fundamental para que los alumnos comprendieran las bases conceptuales y el potencial de la herramienta.
- Preparación del caso: Los estudiantes debían estudiar previamente los modos del SCA y, además, identificar y traer a clase un problema complejo de su interés, que pudiera ser estructurado a lo largo del uso del software. Esta tarea buscó conectar la teoría con la práctica y estimular la reflexión crítica sobre problemas reales.
- Demostración del software: La clase práctica comenzó con una explicación detallada sobre el funcionamiento del software, destacando todas sus funcionalidades y posibilidades de uso. El objetivo era que los estudiantes adquirieran confianza en la herramienta antes de comenzar la aplicación en sus propios casos.
- Aplicación en grupos: Posteriormente, cada grupo se reunió para iniciar la aplicación práctica del software en el problema seleccionado. Este momento fue clave, ya que permitió a los estudiantes

experimentar los desafíos de la estructuración colectiva y explorar las diferentes funcionalidades de la herramienta.

- Elaboración del informe: Finalmente, cada grupo preparó un informe con los resultados obtenidos. En este documento se registraron tanto los avances en la estructuración de los problemas como los comentarios y retroalimentación acerca de las dificultades encontradas y las potencialidades del software.

De esta manera, la experiencia no solo permitió a los estudiantes profundizar en el aprendizaje del SCA y su implementación práctica, sino que también generó insumos valiosos para la mejora del propio software y su adecuación a diferentes contextos educativos y profesionales.

## 4. CONCLUSIONES.

Desde la óptica del proyecto y sus objetivos, el resultado logrado, esto es el desarrollo de una primera versión del prototipo de software para el método SCA, lograda al final del año 2024 y una segunda versión mejorada tanto en los aspectos conceptuales de los cuatro modos del método SCA como en la estabilidad y accesibilidad de la base de datos utilizada y la posterior prueba por los alumnos del ITA y UFF en problemas diferentes, demuestran que la metodología de trabajo propuesta fue exitosa,

La evolución de la aplicación SCA permitió transformar de un sistema inicial limitado a un entorno escalable, multiusuario y multiproyecto, con una arquitectura más robusta y preparada para contextos colaborativos. La integración de funciones como la internacionalización (i18n), el dashboard centralizado con accesos rápidos, las notificaciones en tiempo real y la gestión de carga con bloqueo de acciones críticas contribuyeron a mejorar de manera significativa la usabilidad, confiabilidad e integridad de los datos, ofreciendo a los usuarios una experiencia más intuitiva y segura.

Asimismo, la incorporación de herramientas de apoyo a la toma de decisiones, como la visualización de caminos alternativos, las sumatorias visibles y las pantallas diferenciadas de alternativas válidas e inválidas, ha optimizado la claridad en los procesos de selección. Finalmente, la migración de la base de datos a Supabase garantizó un mejor manejo de datos en tiempo real, mayor facilidad de despliegue y preparación tecnológica para nuevas funcionalidades, consolidando a la aplicación como una plataforma académica y profesional robusta, adaptable y con proyección a futuro.

Es de destacar la ampliación en la conformación del equipo de investigación, con la incorporación en el presente año del Técnico en Programación de computadoras-UB, (integrante a su vez del equipo de alumnos que desarrolló la primera versión del prototipo de software) quien desarrolló la 2ª versión del prototipo y la investigadora-docente de la UFF por sus conocimientos del método SCA, la prueba del prototipo de software mejorado y la transmisión a los alumnos del ITA.

Lo anteriormente expuesto nos motiva a continuar en el marco de esta metodología de enseñanza y trabajo a fin de desarrollar y aplicar prototipos de softwares de otros modelos de IO *soft*, tal como el *Soft System Methodology*

## 5. REFERENCIAS.


- Arangurí García, M. Y. & Bravo Jaico, J. L. (Dir.). (2021). Metodología integral de casos de prueba sustentado en un modelo de verificación de requisitos para desarrollo de software comercial. D - Universidad Señor de Sipán. https://elibro.net/es/lc/ubelgrano/titulos/228963
- Castellini MA, Paucar-Caceres A. (2019). A Conceptual Framework for Integrating Methodologies in Management: Partial Results of a Systemic Intervention in a Textile SME in Argentina. Systems Research and Behavioral Science. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/sres.2552. Printed version, febrero 2019.
- Castellini MA, Paucar-Caceres A. (2022) Un diseño multimetodológico para asistir en problemas de gestión en una industria textil. Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa (EPIO), Vol 30, Nro 51, pp 5-22, ISSN 1853-9777, mayo 2022.
- Françozo R.V., Belderrain M.C. N. (2022) A problem structuring method framework for value-focused thinking. EURO Journal on Decision Processes, 10 (April). ISSN 21939446.

- Friend, J. K. (2011). The Strategic Choice Approach. J. Cochran (ed.), Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science (vol. I), New York – John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9780470400531.eorms0971
- Mingers J., Rosenhead J. (2004) Problem structuring in action, EJOR 152, 530-554
- Hernández Bejarno, M. (2020). Ciclo de vida de desarrollo ágil de software seguro. Fundación Universitaria Los Libertadores. https://elibro.net/es/lc/ubelgrano/titulos/197008
- Otálora-Luna, J. E. Callejas-Cuervo, M. & Alarcón-Aldana, A. C. (2018). Metamodelo de medición de esfuerzo en proyectos de desarrollo de software.. Editorial UPTC. https://elibro.net/es/lc/ubelgrano/titulos/132832
- Trejos Buriticá, O. I. (2017). Lógica de programación. Ediciones de la U. https://elibro.net/es/ereader/ubelgrano/70315?page=21
- Trujillo Casañola, Y. (2015). Modelo para valorar las organizaciones desarrolladoras de software al iniciar la mejora de procesos. Editorial Universitaria. https://elibro.net/es/lc/ubelgrano/titulos/90629

**Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean agradecer a 1) la Universidad de Belgrano y a 2) la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

# INDICADORES DE INNOVACIÓN SOSTENIBLE EN LA FORMACIÓN DE INGENIEROS EN UNIVERSIDADES LATINOAMERICANAS

Fernández, Luciana E.; Romero, Gilda R.; Tort, Daniel; Davila, Lucia.
*Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional*
*lefernandez@frc.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

Este artículo examina la brecha existente en Latinoamérica respecto a la integración de factores tecnológicos y sostenibles en la educación superior para la formación de ingenieros, mediante la implementación de indicadores de innovación y sostenibilidad, con especial énfasis en Argentina y países vecinos. Se analizan parámetros claves para evaluar la capacidad analítica, el compromiso con el cuidado ambiental y la incorporación de tecnologías emergentes en la formación profesional. A través de una revisión bibliográfica sistemática y el análisis de datos secundarios de organismos internacionales, se realiza una comparación de indicadores tecnológicos y ambientales entre instituciones latinoamericanas y otras regiones. Se identifican las limitaciones del entorno educativo que dificultan la adopción de enfoques innovadores y sostenibles, afectando la competitividad de los profesionales latinoamericanos en el contexto global. Los hallazgos destacan déficits específicos en Argentina en la implementación de indicadores de innovación y sostenibilidad, evidenciando la necesidad de marcos conceptuales que faciliten su integración en el ámbito académico. Se proponen posibles indicadores estratégicos basados en diversas fuentes para llevar a cabo en el ambiente universitario teniendo en cuenta el contexto socioeconómico de la región.

**Palabras claves:** Innovación, Sostenibilidad, Indicadores, Formación en Ingenierías, Latinoamérica.

**ABSTRACT**

This study addresses the persistent gap in Latin America regarding the integration of technological and sustainability dimensions into higher education for engineering programs, with a particular emphasis on the implementation of innovation and sustainability indicators, focusing on Argentina and its neighboring countries. It examines key parameters to assess analytical capacity, environmental stewardship, and the adoption of emerging technologies within professional training. Drawing on a systematic literature review and secondary data from international organizations, the research compares technological and environmental indicators between Latin American institutions and counterparts in other regions. The analysis reveals structural limitations within the educational environment that impede the adoption of innovative and sustainable approaches, thereby constraining the global competitiveness of Latin American professionals. In the case of Argentina, the findings reveal specific deficits in the application of innovation and sustainability indicators, underscoring the urgent need for conceptual frameworks that support the integration of these indicators into academic practice. The study proposes a set of strategic indicators, derived from multiple sources, for implementation in university settings, taking into account the socio-economic particularities of the region.

**Keywords:** Innovation, Sustainability, Indicators, Engineering Training, Latin America

## 1. INTRODUCCIÓN

Entre los múltiples cambios ocurridos en las últimas décadas en la sociedad global, el avance tecnológico orientado a la sostenibilidad se ha consolidado como un eje fundamental para el progreso de los pueblos. La ingeniería se originó bajo el paradigma del progreso de la sociedad; concepto que en la actualidad se concibe principalmente en relación con el cuidado y la supervivencia de las especies, incluida la humana. En este marco, la formación de los nuevos profesionales de la ingeniería debe orientarse al desarrollo de capacidades en innovación fundamentadas en un compromiso con la sostenibilidad.

Estas innovaciones, fruto de la investigación y la creatividad, refuerzan la necesidad de promover competencias orientadas a la eficiencia, la optimización de recursos, el cuidado y la regeneración del ambiente, así como al crecimiento social de las comunidades. Este contexto plantea nuevos desafíos para la enseñanza de las ingenierías, en la medida en que exige formar profesionales capaces de innovar con criterios de sostenibilidad. En este sentido, “aunque no de manera exclusiva ni fundamental, una universidad es el ámbito donde se generan, se trasmiten y se aplican conocimientos, y donde se entrelazan diversos factores que operan sobre el impacto social y productivo de ese potencial disponible” (Mansur et al., 2015).

A los fines del presente artículo, la innovación no será analizada desde la perspectiva del proceso de enseñanza aprendizaje, sino desde la enseñanza de la innovación, orientado a desarrollar en los futuros profesionales de ingeniería competencias específicas para innovar en el ejercicio de su disciplina. Por un lado, la urgencia de adecuar la educación a los cambios que vive la sociedad en el conocimiento, la tecnología y la investigación llevó a incorporar a la innovación como aspecto central del nuevo escenario social (UNESCO, 2016). La educación superior demanda nuevos modelos educativos para la formación integral del estudiante en donde están presentes el empleo de las tecnologías de la información y la comunicación, los procesos creativos y la innovación (Veytia Bucheli et al., 2023).

En cuanto a la sostenibilidad, las instituciones de educación superior en todo el mundo están asumiendo un rol de compromiso integral y holístico con este paradigma (Arias-Valle & Marimon, 2024). En consecuencia, las universidades deben situar la sostenibilidad como eje transversal de su misión, constituyéndose en un marco para la formación de profesionales integrales comprometidos con el bienestar del planeta y de la población. En este sentido, “la educación para un desarrollo sostenible tiene como objetivo, dentro del modelo universitario, difundir y promover un conjunto de principios y valores a través de la gestión, la docencia, la investigación y la extensión universitaria” (Fernández Pérez, 2017). De manera complementaria, resulta fundamental la enseñanza de éstos mismos no sólo como un enfoque formativo, sino también como un modelo de gestión organizacional y profesional orientado al crecimiento con responsabilidad y respeto por las generaciones actuales y futuras.

Por lo expuesto anteriormente, surge la necesidad de investigar acerca de la enseñanza de la Innovación Sostenible en el ámbito de las ingenierías en Latinoamérica y, por lo tanto, la búsqueda de indicadores en tal sentido que permitan establecer mediciones de base. En un sentido amplio, un indicador es una herramienta que permite observar y medir, facilitando la toma de decisiones. Por cuanto, contar con indicadores de Innovación Sostenible, permitiría conocer la realidad en la formación en ingenierías y acelerar procesos de transformación y mejora en las potenciales acciones profesionales.

La utilización de indicadores de innovación y sostenibilidad se presenta como una herramienta estratégica para evaluar el grado de avance y la incorporación de estos conceptos en la formación integral. El análisis permitirá identificar tanto las fortalezas como las carencias del sistema educativo en relación con el desarrollo creativo, la capacidad innovadora y el compromiso sostenible de los futuros egresados.

La ausencia o subvaloración de estas competencias limita la capacidad de insertarse y competir en un escenario tecnológico y ambiental global que avanza a gran velocidad. Por ello, introducir estas dimensiones en la formación de los futuros profesionales representa un desafío que exige el compromiso de todas las partes involucradas.

Integrar estas cuestiones en la perspectiva estudiantil y en los programas curriculares permitirá evolucionar al sistema universitario actual, otorgándole a los egresados la capacidad de tomar decisiones en base al desarrollo sostenible, lo que permitirá una ventaja competitiva en el mercado laboral actual, además de ser modelos de enseñanza que permitan *ser y hacer* en el amplio sentido de la innovación sostenible, de manera endógena y exógena.

## 2. INNOVACIÓN SOSTENIBLE

### 2.1. Innovación

El concepto de innovación es amplio y tiene varios subconceptos asociados. Sin embargo, de una manera simple y concreta, la Real Academia Española la define como “la acción y efecto de innovar”, entendiendo por innovar “mudar o alterar algo, introduciendo novedades” (RAE, s.f.). Este concepto permite entender rápidamente que es una palabra que busca una mejora respecto al estado original en el que esta se encontraba, ya sea de carácter tecnológico, productivo, educativo, laboral o social.

Por otro lado, según Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y Eurostat, innovación es “la introducción de un producto (bien o servicio) o de un proceso, nuevo o significativamente mejorado, o la introducción de un método de comercialización o de organización nuevo aplicado a las prácticas de negocio, a la organización del trabajo o a las relaciones externas” (OCDE & EUROSTAT, 2018). La innovación se convierte entonces, en el mundo moderno, en uno de los aspectos más importantes en una sociedad tan tecnologizada y en constante progreso. Sin embargo, el significado y el impacto de la innovación son relativos según el contexto espacial o geográfico en el que se desarrolle, ya que las capacidades locales, las redes de conocimiento, los sistemas productivos regionales y las políticas territoriales influyen directamente en su forma de llevarse a cabo (Asheim et al., 2019).

La innovación puede desarrollarse en múltiples disciplinas, pero en todas persigue el mismo fin: la mejora continua y la generación de cambios favorables. El dominio de sistemas, modelos y herramientas de gestión de la innovación constituye hoy una ventaja competitiva en el ámbito laboral. En este sentido, su incorporación en la formación universitaria es clave para potenciar el crecimiento académico y la proyección profesional de los futuros ingenieros.

### 2.2. Sostenibilidad

Desde el informe Brundtland de 1987 en el que se acuñó el término de desarrollo sostenible como “todo aquél que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades”. Este documento se ocupó de la tensión entre las aspiraciones de la humanidad hacia una vida mejor, y por otro lado, las limitaciones impuestas por la naturaleza. Con el paso del tiempo el concepto fue reinterpretado abarcando la contradicción real entre los fines del bienestar para todos y la conservación ambiental (Kuhlman & Farrington, 2010).

Según distintos autores la sostenibilidad es un trabajo, esfuerzo o acción pensada para obtener un presente, pero sobre todo un futuro en el que los distintos factores sociales, laborales y ambientales puedan ser mejores o restaurados para las próximas generaciones. Para Andreu Pinillos (2014), “trabajar por la sostenibilidad es trabajar por un modelo de empresa capaz de pensar en el largo plazo y de superar la tentación de caer en eso que, con tanta precisión, refleja el refranero castellano: “pan para hoy, hambre para mañana”. En esta línea, Lélé (1991) expresa: “la existencia de las condiciones ecológicas necesarias para sostener la vida humana en un nivel especificado de bienestar a lo largo de las futuras generaciones”. Para Ayres (2008), la sostenibilidad es un concepto normativo sobre cómo los seres humanos deben actuar en relación con la naturaleza, y cómo son responsables los unos de los otros y de las generaciones futuras. En este contexto, se señala que la sostenibilidad es propicia para el crecimiento económico basado en la justicia social y el uso eficiente de los recursos naturales (Cortés Mura & Peña Reyes, 2015).

Por lo expuesto, se afirma que la sostenibilidad dejó de ser un concepto emergente para convertirse en un principio ampliamente reconocido y necesario frente a los desafíos ambientales y sociales contemporáneos. No obstante, en América Latina su incorporación plena resulta compleja, debido en gran medida a la limitada prioridad que recibe en los ámbitos educativo y social. Esta situación plantea un desafío adicional, dado que muchos países en vías de desarrollo enfrentan, además, una mayor vulnerabilidad frente a los impactos del cambio climático.

### 2.3. Innovación Sostenible

La integración de innovación y sostenibilidad constituye un pilar estratégico en la formación de profesionales, especialmente en el ámbito de la ingeniería, dado que permite concebir nuevas soluciones capaces de equilibrar la rentabilidad empresarial con la preservación de los recursos naturales, incluida su restauración, y el bienestar de las generaciones futuras. En este sentido, formar en innovación sostenible no solo responde a una tendencia global, sino a una necesidad urgente para garantizar la resiliencia de los sistemas productivos y la competitividad de los países de la región. Este

enfoque fortalece el desarrollo económico, productivo y laboral, impulsando organizaciones que generan valor de triple impacto: beneficios tangibles para la sociedad y ventajas competitivas para sí mismas.

Porter y Kramer (2011) en su *Teoría del Valor Compartido* exponen que "las empresas deben asumir el liderazgo para volver a unir los negocios con la sociedad. Ya hay empresas más avanzadas y pensadores líderes que reconocen esta necesidad, y ya están emergiendo elementos promisorios de un nuevo modelo." Es decir, denotan la necesidad de innovar en los modelos de negocios, a favor de la sostenibilidad empresarial en su espectro más amplio. Estos autores prosiguen afirmando que "la solución está en el principio del valor compartido, que involucra crear valor económico de una manera que también cree valor para la sociedad al abordar sus necesidades y desafíos… El valor compartido no es responsabilidad social ni filantropía y ni siquiera sustentabilidad, sino una nueva forma de éxito económico. No está en el margen de lo que hacen las empresas, sino en el centro". Los autores señalan también que empresas como GE (General Electric), Google, IBM, Intel, Johnson & Johnson, Nestlé, Unilever y Wal-Mart, ya se han embarcado en importantes esfuerzos por crear valor compartido al reconcebir la intersección entre la sociedad y el desempeño corporativo. En consecuencia, la educación en innovación sostenible debe entenderse como una condición estructural para el desarrollo de la región y no como un complemento curricular. Considerar su inclusión de manera integrada en la formación de profesionales, y constituir un eje prioritario e indispensable en las carreras de ingeniería, ciencia y tecnología.

La incorporación sistemática de la innovación sostenible permitirá formar egresados con competencias estratégicas que trasciendan lo técnico y se orienten a la transformación de los sistemas productivos, sociales y ambientales. Este enfoque no solo eleva la competitividad de las instituciones de educación superior, sino que asegura profesionales preparados para responder a los desafíos globales con soluciones innovadoras, sostenibles y de triple impacto. En un escenario donde la sostenibilidad se ha convertido en un criterio clave de desarrollo tecnológico y social, formar ingenieros bajo esta perspectiva es una condición indispensable para garantizar su relevancia y liderazgo en el mundo contemporáneo.

### 2.4. Indicador

El término indicador proviene del latín "indicare", que comprende el significado de señalar, enseñar o mostrar. En el mismo sentido, la ONU (2010) enfatiza en que un indicador es una "característica específica, observable y medible que puede ser usada para mostrar los cambios y progresos que está haciendo un programa hacia el logro de un resultado específico".

Desde la vertiente estratégica Kaplan y Norton (1996) sostienen que: "los indicadores permiten transformar la visión y la estrategia en objetivos operativos, y vincularlos con medidas de desempeño a lo largo de la organización, vinculando metas estratégicas con acciones operativas".

En un sentido amplio, un indicador es una herramienta que permite observar, medir, comparar y evaluar el grado de avance o cumplimiento de un objetivo, meta, resultado esperado o fenómeno, facilitando la toma de decisiones, el monitoreo y la rendición de cuentas; funciona como señal que orienta el seguimiento, tanto en contextos cuantitativos como cualitativos, debiendo ser claro, específico y estar debidamente enfocado. A su vez, dicha medida debe ser simple, con un rango o alcance definidos para ser interpretada correctamente. El indicador debe ser válido, confiable, preciso, medible, oportuno e importante programáticamente (ONU, 2010).

En el contexto de la formación en ingeniería, el uso de indicadores precisos resulta clave para evaluar el grado de desarrollo de competencias en innovación sostenible. Estos indicadores no solo permiten medir de manera objetiva los avances en el aprendizaje y la aplicación de dichos conceptos, sino que también ofrecen una base sólida para retroalimentar los procesos educativos con el objetivo de contribuir en estas habilidades. Formar ingenieros en innovación sostenible implica dotarlos de herramientas que les permitan enfrentar problemas complejos con enfoques creativos, responsables y alineados a los desafíos globales. De este modo, la universidad cumple un rol estratégico al preparar egresados capaces de generar soluciones que integren competitividad, desarrollo tecnológico y compromiso con la sostenibilidad ambiental y social.

#### 2.4.1. Indicador de innovación

Indicadores de innovación, en términos generales, "son medidas estadísticas que reflejan las actividades relacionadas con la introducción de productos, procesos, métodos de comercialización o

prácticas organizacionales nuevas o significativamente mejoradas", OCDE & Eurostat (2018, p. 20). Según Freeman & Soete (1997), "permiten observar el comportamiento innovador en empresas, sectores o países, tanto desde el punto de vista de sus capacidades como de sus resultados".

Por ejemplo, en lo que refiere al ámbito educativo, "Los indicadores en innovación educativa deben traducir los objetivos de formación en evidencias observables que permitan evaluar el impacto del aprendizaje en contextos reales" (Zabalza, 2007).

En este sentido, en esta investigación se buscó identificar indicadores claves para medir el logro de aprendizajes y competencias vinculadas a la innovación, aportando criterios objetivos y comunes para evaluar la calidad y pertinencia de las soluciones propuestas. Por ejemplo, se buscaron indicadores de referencia para el parámetro: cantidad de materias que brindan contenidos de "gestión, sistemas, modelos o herramientas de innovación".

### 2.4.2. Indicador de sostenibilidad

En términos de sostenibilidad, los indicadores "permiten medir el grado en que las acciones humanas afectan el entorno natural, social y económico, proporcionando evidencia para el seguimiento de estrategias de desarrollo sostenible", Naciones Unidas (2023). En consecuencia, estos indicadores permiten operacionalizar el concepto amplio de sostenibilidad. Se trata de herramientas críticas que permiten a tomadores de decisiones y al público evaluar el progreso; enfatizan la relevancia de estas medidas como instrumentos de comunicación y su aplicabilidad en múltiples escalas, desde lo local hasta lo global. (Hák et. al, 2007).

De igual modo, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) ofrecen un marco de referencia que permite implementar metas e indicadores orientados a valorar el grado de compromiso e incorporación de la sostenibilidad en la formación de ingenieros y en las políticas educativas asociadas.

En igual sentido, en esta investigación se buscó identificar indicadores claves para medir el logro de aprendizajes y competencias vinculadas a la sostenibilidad en la formación de ingenieros.

### 2.4.3. Indicador efectivo e indicador de desempeño

El concepto de indicador efectivo fue consolidado por el OECD (2008) como parte del enfoque metodológico de los indicadores compuestos. En en el *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide* de la OECD (2008, p. 17) se discute la importancia de la calidad de los indicadores individuales en la construcción de indicadores compuestos y se enfatiza que: la calidad de un indicador compuesto depende en gran medida de la calidad de los indicadores individuales que lo componen. Esta declaración subraya que un indicador efectivo debe estar respaldado por un marco teórico sólido y utilizar datos confiables y pertinentes. Además, el manual destaca la necesidad de que los indicadores individuales sean relevantes para los fenómenos que se desean analizar y que no distorsionen la realidad, permitiendo así una evaluación precisa y útil para la toma de decisiones.

Por otro lado, un indicador de desempeño es una razón o proporción, porcentaje u otro valor cuantitativo, que permite a una institución comparar su posición en áreas estratégicas, según criterios de especialistas propios o externos, con el desempeño pasado y metas institucionales establecidas, es decir, midiendo el grado de avance respecto a metas, objetivos o resultados concretos. Los indicadores permiten a los tomadores de decisiones evaluar la posición estratégica de la institución y realizar análisis comparativos posteriores (UNAM, 2013).

### 2.4.4. Indicadores en el ámbito académico

En lo que se refiere a la gestión académica, la UNESCO-IESALC (2007) destaca que: "Los indicadores académicos permiten medir la calidad de la educación superior, constituyendo herramientas claves para procesos de autoevaluación, acreditación y mejora continua". Por su parte, Brunner (2009) indica que: "Los indicadores de desempeño en educación superior deben vincularse con los objetivos institucionales y permitir el seguimiento de resultados en docencia, investigación, extensión y gestión". La OECD (2023) destaca que: "Los indicadores educativos permiten observar, medir y analizar el grado en que los objetivos de política educativa se están cumpliendo, al tiempo que orientan decisiones de mejora".

En términos generales, los indicadores de gestión académica permiten evaluar la eficacia, eficiencia y calidad de los procesos educativos, administrativos y académicos en instituciones educativas. Entre los ejemplos más habituales se incluyen la tasa de graduación, la relación docente/alumno, la productividad científica y la satisfacción estudiantil, entre otros.

En este contexto de ideas, Mansur et al. (2015) expresan "los indicadores de las acciones tecno-científicas universitarias que habitualmente son colectados (acreditación universitaria, categorizaciones, reportes de investigación y de extensión universitaria, etc.), fundamentalmente responden a una lógica académica, hacen prevalecer una mirada de análisis de resultados endógena, donde el sector científico-académico se observa a si mismo y escasamente involucran un diagnóstico de impactos sobre usuarios finales del conocimiento (organizaciones sociales, empresas, gobiernos, sociedad en general)".

Finalmente, más allá de las métricas tradicionales de calidad académica, resulta necesario incorporar indicadores que midan el grado en que las universidades integran en sus planes de estudio competencias estratégicas vinculadas a la innovación sostenible. En este sentido, los indicadores académicos deben funcionar como herramientas que orienten a las instituciones hacia la formación de profesionales preparados para responder a los desafíos sociales, ambientales y productivos del siglo XXI.

## 3. RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

Históricamente, Latinoamérica ha sido un conjunto de sociedades volátiles en términos sociales, económicos y estructurales. No obstante, en el siglo XXI algunos países han tenido una evolución tecnológica y social significativa como es el caso de Brasil o Chile (SELA, 2021). Sin embargo, también por consecuencia de la globalización los conceptos de este estudio se han visto apaciguados ya sea por falta de políticas educativas al respecto o por falta de interés de la sociedad en general que supone que cualquier avance innovador o sostenible va a provenir únicamente de los llamados países de "primer mundo".

En esta misma línea, en un ranking del año 2024, realizado por Times Higher Education (2025), se observó que de los 17 objetivos de desarrollo sostenible tanto las universidades hispanohablantes como universidades brasileñas se encuentran desde el puesto 101 en adelante, siendo las más destacadas la Universidad de Sao Paulo, Universidad Estadual Paulista, Universidad de Campinas y la Pontificia Universidad Católica de Chile. De lo mencionado anteriormente, el ODS (Objetivo de Desarrollo Sostenible) que mejor desempeño tiene corresponde al número 9: Industria, Innovación e Infraestructura.

Por otro lado, según OCDE, la inversión destinada a programas de I+D (Investigación y Desarrollo) en la región se encuentra en un 0,75% de promedio, mientras que el promedio en países miembros de OCDE posee un 2,3%. Se puede decir que Latinoamérica no tiene una base innovadora o sostenible a nivel mundial, por lo menos, no de las más representativas. En consecuencia, resulta de necesidad y urgencia poder consolidar las bases para que en esta región del planeta se tenga en la educación superior conciencia, compromiso y el deseo de poder implementar herramientas que hagan al estudiante un ser innovador y sostenible; no solo para el desarrollo personal y profesional, sino también para poder llegar a ser un benefactor social (Banco Interamericano de Desarrollo [BID] & Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE], 2022).

Asimismo, Capdevila (2023) destaca que "Estados Unidos posee 150 mil investigadores más que el conjunto de toda la región, se torna imperante para la especialista impulsar la enseñanza en innovación, tecnología e ingeniería para generar desarrollos acordes con los tiempos venideros". Además, agregó que "América Latina no tiene todavía la infraestructura básica para desarrollar inteligencia artificial; la preocupación tiene que enfocarse en cuestiones básicas: educación e infraestructura para lograr en cuatro décadas lo que consiguió Taiwán, un país que anteriormente era pobre y hoy es una referencia en la materia".

En cuanto al panorama reciente: según el índice Global de Innovación 2024, Argentina ocupa el puesto 76, mientras que Brasil el 50, Chile el 51 y México el 56 (World Intellectual Property Organization, 2024). El estudio revela que Chile y Brasil encabezan en América Latina la integración de tecnologías avanzadas y políticas ambientales en la educación universitaria. No obstante, se demuestra una problemática regional, ya que ninguno de los países mencionados se encuentra entre los primeros 30.

En Argentina, en el año 2019 la Red de Vinculación Tecnológica de las Universidades Nacionales de Argentina lanzó una red interuniversitaria de spin-offs, que permiten impulsar empresas a través de la investigación universitaria (RedVITEC, 2023). Estos acontecimientos reflejan la implementación de un modelo de triple hélice, en el que se combina la participación académica, estatal y empresarial. Establecer alianzas estratégicas con el sector productivo aseguraría una transferencia efectiva y un modelo de beneficio mutuo entre el centro educativo y la empresa u organización responsable de financiarlo.

En el año 2021, en Argentina se dicta la ley 27.621 de Educación Ambiental Integral que establece el derecho a la educación ambiental en todos los niveles y modalidades educativas como política pública nacional. Tiene como objetivo formar ciudadanos con conciencia ambiental, promoviendo la comprensión holística de los problemas ambientales y el ejercicio del derecho a un ambiente sano.

Posterior a la implementación de esta ley, Arias-Valle & Marimon (2024) relevó datos de 132 instituciones de educación superior (IES) en la Argentina a través de un análisis descriptivo y correlacional, con un enfoque cuantitativo. Sus resultados demuestran que sólo el 21% de las instituciones relevadas han incorporado la sostenibilidad en sus actividades de extensión, resaltando la preponderancia de las IES públicas en relación con las privadas en dicha aplicación. Las autoras indican que “la inclusión de la sostenibilidad en la misión institucional y la formación de alianzas estratégicas fueron identificadas como factores críticos de éxito para estas iniciativas. Sin embargo, existe una fragmentación en la implementación de estas políticas lo que limita su impacto sistémico”.

En resumen, Argentina muestra déficits notorios, resultando necesario definir marcos conceptuales e indicadores específicos que orienten la integración de la innovación sostenible con mediciones claras para evaluar la formación, implementación, grado de avance y definición de acciones de mejora.

A pesar de los avances parciales descritos, no se han observado en las universidades latinoamericanas sistemas consolidados de indicadores que midan la innovación sostenible de manera integral. Esta ausencia constituye una debilidad estructural, ya que sin herramientas de medición adecuadas resulta imposible valorar el impacto real de las políticas educativas, ni garantizar que los egresados estén adquiriendo competencias alineadas con los desafíos ambientales, sociales y productivos actuales. En consecuencia, el desarrollo y la aplicación de indicadores específicos de innovación sostenible en la formación universitaria se torna no sólo una necesidad académica, sino una condición indispensable para el fortalecimiento de la competitividad regional y el compromiso con el desarrollo sostenible global.

## 4. PROPUESTA

La ausencia de indicadores claros y específicos en innovación sostenible dentro de la formación en ingeniería en Latinoamérica, según la literatura consultada, evidencia la necesidad de avanzar hacia un marco metodológico que permita no solo diagnosticar la situación actual, sino también orientar acciones estratégicas. Sin indicadores, la innovación sostenible corre el riesgo de quedar en el plano declarativo, sin capacidad de ser medida, evaluada o mejorada. En este sentido, la propuesta que se desarrolla a continuación busca establecer un conjunto de indicadores aplicables al ámbito universitario, diseñados para integrar de manera efectiva la innovación y la sostenibilidad en la formación de ingenieros.

En lo que refiere a la formación ingenieril, se busca generar indicadores estratégicos de seguimiento, que permitan fortalecer la capacidad de innovar en productos, procesos y servicios que sean útiles, viables y responsables con el entorno, incorporando la gestión organizacional y la toma de decisiones bajo el enfoque de la sostenibilidad.

Estos indicadores se plantean como un marco de referencia inicial y como herramientas de gestión académica y profesional, orientadas a garantizar que los futuros egresados no solo cuenten con competencias técnicas, sino también con la capacidad crítica y transformadora necesaria para enfrentar los desafíos globales y contribuir a la mejora continua de los planes de estudio. La tabla 1 resume los indicadores de innovación sostenible propuestos para la formación de ingenieros.

*Tabla 1 - Indicadores de innovación sostenible en la formación de ingenieros*

| Nombre indicador | Objetivo | Unidad de medida | Posibles fuentes | Dimensión |
|---|---|---|---|---|
| Cobertura curricular en innovación sostenible | Conocer cuántas materias incorporan contenidos de innovación y sostenibilidad | % = Materias con estos contenidos / Total de materias por carrera x 100. | Planes de estudio oficiales y análisis de la documentación curricular | Competencias y Formación |
| Desarrollo de competencias en innovación sostenible | Medir adquisición de competencias para innovación y sostenibilidad según clasificación del CONFEDI. | Nivel de competencias alcanzadas en:<br>1. Generación de desarrollos o innovaciones tecnológicas.<br>2. Actuar considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global. | Declaración de nivel de competencias desarrolladas en las Planificaciones académicas oficiales. | |
| Proyectos finales de graduación con propuestas de soluciones tecnológicas sostenibles | Medir la integración de aplicación de soluciones tecnológicas y sostenibles en proyectos finales. | % = Cantidad de proyectos finales con componentes tecnológicos sostenibles / total de proyectos en la carrera por año. | Registros de proyectos finales académicos y tesis | Tecnológica e Innovación |
| Reducción de huella de carbono | Cuantificar la cantidad de proyectos que incluyen el cálculo de huella de carbono asociado. | % = cantidad de proyectos finales que miden el $CO_2$ equivalente reducido / total de proyectos finales en la carrera por año. | Registros de proyectos finales académicos y tesis | Impacto ambiental |
| Proyectos finales con desarrollos de impacto en comunidades locales | Medir contribución al bienestar social | % = Número de proyectos finales con desarrollos de impacto en comunidades locales / total de proyectos en la carrera por año. | Registros de proyectos finales académicos y tesis | Impacto social |

Los indicadores se concentran en las siguientes dimensiones:

1) **Competencias y Formación:** refiere al desarrollo de habilidades y conocimientos de los estudiantes para presentar soluciones innovadoras de manera sostenible, incluyendo ética, pensamiento crítico, gestión de proyectos y conocimiento de normativas ambientales y sociales. Busca garantizar que la innovación sostenible no dependa únicamente de herramientas o proyectos aislados, sino de profesionales capacitados para diseñar, implementar, evaluar y tomar decisiones en base a soluciones integrales.

Según el Consejo Federal de Decanos de Facultades de Ingeniería (CONFEDI, 2014) en su libro de “Competencias de la ingeniería” cuyo documento que sintetiza las Competencias Genéricas de Egreso del Ingeniero Argentino y latinoamericano, plantea entre otras las siguientes competencias: “5. Competencia para contribuir a la generación de desarrollos tecnológicos y/o innovaciones…. y 8. Competencia para actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global”. Por cuanto se desea medir el grado de formación en estas competencias estipuladas.

2) **Tecnológica e Innovación:** centrada en el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías, métodos y prototipos que generen soluciones eficientes y sostenibles. Incluye el uso de herramientas digitales avanzadas (IA, IoT, Big Data), energías limpias y procesos innovadores en proyectos académicos y productivos de finalización de carrera.

   La innovación tecnológica debe ser integrada con criterios ambientales y sociales para crear soluciones que reduzcan impactos negativos y mejoren la eficiencia de los recursos.

3) **Impacto ambiental:** esta dimensión evalúa cómo los proyectos, prototipos o iniciativas académicas afectan el medio ambiente, considerando huella de carbono, consumo de recursos, residuos, biodiversidad y economía circular.
   La innovación debe ser también responsable, por lo que integrar estos criterios promueve que los futuros profesionales de la ingeniería puedan identificar riesgos, reducir impactos negativos y generar soluciones con beneficios ambientales y de regeneración de los ecosistemas. Sin esta dimensión, la innovación puede ser eficiente pero ecológicamente insostenible.

4) **Impacto social:** focaliza en el impacto de los proyectos en la sociedad y comunidades locales, incluyendo bienestar, equidad, educación y justicia.
   Toda innovación sostenible requiere generar valor social además de económico y ambiental. De esta manera se promueve la consideración de las personas y comunidades como beneficiarias de los proyectos, fomentando soluciones que mejoren la calidad de vida y promuevan la responsabilidad social en la práctica profesional.

Los indicadores en estas dimensiones permiten medir, tanto de manera cuantitativa como cualitativa, aspectos clave de la formación y del desarrollo de competencias en innovación sostenible dentro de las ingenierías. A partir del diagnóstico de la situación actual, funcionan como guía para la planificación y la mejora continua, aportando evidencia concreta que orienta la definición de acciones estratégicas y la alineación de recursos, currículos, competencias y metodologías con objetivos claros de innovación sostenible.

De este modo, los indicadores no solo permiten medir avances, sino que se convierten en catalizadores de un cambio profundo en la educación superior, impulsando la consolidación de una formación ingenieril orientada a la innovación sostenible como requisito ineludible para el desarrollo de la región. Cada indicador combina novedad, eficiencia o creatividad con impacto ambiental, social o económico responsable (sostenibilidad) para garantizar que la medición no se limite a innovación aislada ni a sostenibilidad sin creatividad o aplicación tecnológica. Luego, la recopilación periódica de datos de estos indicadores permitirá ajustar estrategias educativas, recursos y objetivos, fomentando un ciclo de mejora continua.

## 5. CONCLUSIÓN

La investigación confirma que, en Argentina, y en gran parte de Latinoamérica, persiste la inexistencia de indicadores específicos que integren de manera sistemática la innovación sostenible en la formación de ingenieros. Esta limitación impide evaluar con precisión los avances académicos y profesionales, manteniendo a los programas de educación superior en un plano más declarativo que operativo en estos contenidos.

Frente a este escenario, la propuesta presentada busca sentar las bases de un marco conceptual y metodológico que incorpore indicadores de innovación sostenible en el ámbito de la formación académica. Dichos indicadores, centrados en la evaluación de proyectos finales y en el desarrollo de competencias de ingeniería alineadas a los lineamientos del CONFEDI, constituyen una herramienta estratégica para medir resultados, identificar fortalezas y áreas de mejora, así como facilitar la

integración de enfoques innovadores y sostenibles en el currículo y garantizar que los egresados no solo posean competencias técnicas, sino también capacidades críticas, creativas y sostenibles.

En definitiva, avanzar hacia la implementación de estos indicadores representa un paso necesario para consolidar una educación superior más pertinente y formar ingenieros capaces de responder a las demandas sociales, ambientales y productivas del siglo XXI.

## 6. BIBLIOGRAFÍA


Arias-Valle, M. B., & Marimon, F. (2024). Las instituciones argentinas de educación superior, ¿impulsan la sostenibilidad? *Revista Andina de Educación, 8*(1), 1–12.

Andreu Pinillos, A. (2014, abril 2). *Sostenibilidad… esa palabra (no tan) de moda*. *Planeta Futuro* (El País). Actualizado el 2 de abril de 2014. Recuperado de https://elpais.com/elpais/2014/04/02/planeta_futuro/1396432365_753739.html

Asheim, B., Grillitsch, M., & Trippl, M. (2019). Regional innovation systems: Past, present and future. *Revista Galega De Economía*, *28*(2), 4-22. https://doi.org/10.15304/rge.28.2.6190

Ayres, R. U. (2008). *Sustainability economics: Where do we stand? Ecological Economics, 67*(2), 281–310. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.12.009

Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2022). *BID y OCDE apoyarán a los países de América Latina y el Caribe que buscan unirse a la OCDE*. https://www.iadb.org/es/noticias/bid-y-ocde-apoyaran-los-paises-de-america-latina-y-el-caribe-que-buscan-unirse-la-ocde

Brunner, J. J. (2009). *Tendencias de la educación superior: Desafíos para la calidad y la pertinencia*. UNESCO-IESALC.

Capdevila, I. (2023, 3 de julio). *América Latina, una región rezagada en innovación y desarrollo*. MUNDO UNTREF. https://www.untref.edu.ar/mundountref/america-latina-una-region-rezagada-en-innovacion-y-desarrollo

Consejo Federal de Decanos de Facultades de Ingeniería (CONFEDI). (2014). *Competencias genéricas. Desarrollo de competencias en la enseñanza de la ingeniería argentina*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan. Recuperado de https://confedi.org.ar/download/documentos_confedi/Cuadernillo-de-Competencias-del-CONFEDI.pdf

Cortés Mura, H. G., & Peña Reyes, J. I. (2015). *De la sostenibilidad a la sustentabilidad. Modelo de desarrollo sustentable para su implementación en políticas y proyectos.* Revista Escuela de Administración de Negocios, (78), 40–54. Recuperado de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=20640430004

Fernández Pérez, A. (2018). *Educación para la sostenibilidad: Un nuevo reto para el actual modelo universitário.* Research, Society and Development, 7(4), 1–19. https://doi.org/10.17648/rsd-v7i4.219

Freeman, C., & Soete, L. (1997). *The economics of industrial innovation* (3rd ed.). MIT Press.

Hák, T., Moldan, B., & Dahl, A. L. (2007). *Sustainability indicators: A scientific assessment*. Island Press.

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1996). *The balanced scorecard: Translating strategy into action*. Harvard Business School Press.

Kuhlman, T., & Farrington, J. (2010). *What is sustainability?* https://doi.org/10.3390/su2113436

Lélé, S. M. (1991). Sustainable development: A critical review. *World Development, 19*(6), 607–621. https://doi.org/10.1016/0305-750X(91)90197-P

Mansur, S.; Almada, A.; Fernandez, L.; Garzón, Á. (2015). *Gestión Integral del Conocimiento en Universidades: escenario de oportunidades.* COINI, Córdoba.

OECD. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264043466-en

OECD. (2023). Education at a Glance 2023: OECD Indicators. OECD Publishing.

OECD & Eurostat. (2018). *Oslo Manual 2018: Guidelines for collecting, reporting and using data on innovation* (4th ed.). OECD Publishing.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2010). *Indicadores*. ONU Mujeres (ENDVAW, Ending Violence Against Women). Recuperado de https://www.endvawnow.org/es/articles/336-indicators.html

Porter y Kramer (2011). *La creación de valor compartido*. Harvard Business Review America Latina. Vol. 89, Número 1. Pág. 31-49.

Real Academia Española. (RAE). (s.f.). *Innovación*. En Diccionario de la lengua española [en línea]. Recuperado el 08/08/2025 de https://dle.rae.es/innovación

RedVITEC (Consejo Interuniversitario Nacional). (2023, 22 de junio). *Se lanzó la primera Red interuniversitaria de Spin-Off de Argentina* [Entrada web]. RedVITEC. Recuperado de https://redvitec.cin.edu.ar/inicio/noticias/1722-se-lanz%C3%B3-la-primera-red-interuniversitaria-de-spin-off-de-argentina.html

SELA. (2021, 9 de diciembre). *Chile y Brasil lideran ranking de innovaciones tecnológicas en América Latina*. Servicio Latinoamericano y del Caribe de Estudios sobre Integración. https://www.sela.org/innovacion

Times Higher Education. (2025). *Impact Rankings 2025: Universidades argentinas*. https://www.timeshighereducation.com/impactrankings#!/length/25/locations/ARG/sort_by/rank/sort_order/desc/cols/stats

Universidad Nacional Autónoma de México. (UNAM) (2013). *Indicadores de desempeño para escuelas y facultades de educación superior de la UNAM*. Dirección General de Planeación. Recuperado de https://www.planeacion.unam.mx/Planeacion/Apoyo/IndDesFinal_oct31.pdf

UNESCO-IESALC. (2007). *Indicadores de gestión universitaria para América Latina y el Caribe*.

UNESCO. (2016). *Innovación educativa* (Serie “Herramientas de apoyo para el trabajo docente”). Lima: UNESCO. Recuperado de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247005

United Nations. (2023). *The Sustainable Development Goals Report 2023*. UN Department of Economic and Social Affairs.

Veytia Bucheli, M. G., Aguirre Aguilar, G., & Barrios Pérez, E. G. (2023). *TIC, creatividad e innovación: estrategias en la configuración de ambientes para el aprendizaje universitario* [ICT, creativity and innovation: Strategies in the configuration of environments for university learning]. *IE Revista de Investigación Educativa de la REDIECH, 14*, e1854. https://doi.org/10.33010/ie_rie_rediech.v14i0.1854

World Intellectual Property Organization. (2024). *Global Innovation Index 2024: Unlocking the promise of social entrepreneurship*. https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2024/en/gii-2024-results.html

Zabalza, M. A. (2007). *Competencias docentes del profesorado universitario: Calidad y desarrollo profesional*. Narcea.

# PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN COMO ESPACIO FORMATIVO EN LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL: UNA EXPERIENCIA DE INICIACIÓN INVESTIGATIVA EN TORNO AL COOPERATIVISMO EN ROSARIO

Viri, Mariana; Toscano, Julieta; De Vito, Marcos

*Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario*

**Palabras clave:** Formación integral en Ingeniería; Investigación formativa; Economía social y solidaria

## 1. INTRODUCCIÓN

La formación integral de los estudiantes de Ingeniería Industrial requiere, cada vez más, de experiencias educativas que amplíen el enfoque estrictamente técnico incorporando dimensiones sociales, humanísticas y críticas en el abordaje de problemáticas reales.

La investigación formativa, también conocida como "enseñar a través de la investigación", constituye una estrategia pedagógica orientada al desarrollo del currículo que promueve el aprendizaje autónomo, la curiosidad y el rigor intelectual. Esta metodología incentiva la participación activa de los estudiantes en su propio proceso de formación. A través de la formulación de preguntas, la indagación y la resolución de problemas reales, se busca que los alumnos desarrollen tanto competencias básicas, como la observación, la descripción y la comparación, junto con procesos mentales más complejos, tales como la interpretación, el análisis crítico, el pensamiento prepositivo y la capacidad relacional (Parra, 2009).

En este marco, el plan de estudios de la carrera de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario (UNR) contempla la participación en proyectos de investigación como actividad acreditable a través de espacios curriculares electivos. Estos espacios ofrecen trayectos formativos flexibles orientados a los intereses individuales y promueven una formación más contextualizada, reflexiva y comprometida.

El presente trabajo tiene como objetivo reconstruir y reflexionar sobre la experiencia de cuatro estudiantes que participaron en el proyecto de investigación "Aportes de la Ingeniería Industrial para el desarrollo de la Economía Social y Solidaria: desafíos y oportunidades", con sede en la UNR. Este proyecto aborda el rol que puede asumir la Ingeniería Industrial en el fortalecimiento de estas formas organizativas, haciendo foco en las cooperativas del Departamento Rosario, caracterizado por una sólida tradición cooperativa.

Esta experiencia de iniciación en la investigación favoreció el desarrollo de competencias técnicas y metodológicas, así como de habilidades humanas y una comprensión más profunda de los principios y valores del cooperativismo. En efecto, puede decirse que permitió que los estudiantes amplíen su concepción del rol de la Ingeniería Industrial y de su aporte a la transformación social.

## 2. MARCO TEÓRICO

La Economía Social y Solidaria (ESS) es un sector que, en Argentina, posee una tradición histórica vinculada al mutualismo y al cooperativismo, con raíces que se remontan al siglo XIX. Su desarrollo contemporáneo se consolidó a partir de experiencias que emergieron en los años setenta y se intensificaron tras la crisis de 2001, constituyéndose en una alternativa socioeconómica frente a los procesos de exclusión social y precarización laboral (Novillo Martínez, 2015). La ESS comprende un entramado diverso de actores, como cooperativas, mutuales, empresas recuperadas, agricultura familiar, emprendimientos sociales, redes de comercio justo, entre otro, que comparten principios como la gestión democrática, la solidaridad, la primacía de las personas por sobre el capital y la búsqueda de la sostenibilidad. La Organización Internacional del Trabajo (2022) ha definido a este sector como un conjunto de entidades económicas, sociales y medioambientales orientadas al interés colectivo, destacando su capacidad para generar trabajo decente y contribuir al desarrollo sostenible.

La articulación entre la Ingeniería Industrial y la ESS abre un campo de acción emergente y necesario. Tradicionalmente, la profesión se vinculó con el ámbito manufacturero y de servicios, orientada a la optimización de procesos, el diseño de sistemas productivos y la gestión eficiente de recursos. No obstante, diversos documentos académicos y profesionales destacan la importancia de formar ingenieros con visión crítica, flexibilidad para desempeñarse en equipos interdisciplinarios y compromiso con los impactos sociales y ambientales de su labor (Toscano et al., 2024). Integrar estas competencias al trabajo con organizaciones de la ESS no solo amplía el horizonte de la disciplina, sino que enriquece la formación con una perspectiva humanista y comprometida con el desarrollo territorial. La ESS requiere del fortalecimiento de capacidades técnicas, productivas y de gestión, y la Ingeniería Industrial puede aportar herramientas valiosas para consolidar su sustentabilidad respetando los principios y valores fundantes.



El proyecto de investigación "Aportes de la Ingeniería Industrial para el desarrollo de la Economía Social y Solidaria: desafíos y oportunidades" constituye un espacio de articulación entre formación académica, producción de conocimiento y compromiso social. Su objetivo central es diseñar e implementar intervenciones que integren herramientas y enfoques propios de la Ingeniería Industrial en cooperativas de la región de Rosario, respetando los valores de la ESS. La propuesta se apoya en una metodología de investigación con enfoque mixto, que combina la construcción teórica con la experiencia práctica y fomenta la participación activa de los actores sociales involucrados. Al mismo tiempo, promueve el trabajo interdisciplinario entre ingenieros y profesionales de otras áreas, lo que amplía las perspectivas de análisis y acción.

En este sentido, el plan de estudios de la carrera de Ingeniería Industrial de la FCEIA incorpora Espacios Curriculares Electivos como instancias de flexibilidad que permiten a los estudiantes orientar parte de su trayectoria formativa de acuerdo con sus intereses y motivaciones. La posibilidad de acreditar estos espacios a través de la participación en proyectos de investigación cobra especial relevancia, en tanto la UNR ha desarrollado normativas que amplían y diversifican los mecanismos de reconocimiento académico, consolidando la investigación como una alternativa formativa legítima dentro del recorrido curricular. La Resolución Nº 996/2018 reglamentó el procedimiento para dicha acreditación, contemplando actividades como proyectos de investigación, extensión, congresos o intercambios académicos. Más recientemente, la Resolución N°753/2024 creó los denominados Espacios Curriculares Flexibles, reafirmando el valor pedagógico de experiencias académicas extracurriculares y formalizando la participación estudiantil en proyectos como una vía legítima de acreditación curricular. En estas disposiciones, la UNR reconoce la importancia de que la formación profesional se articule con actividades de producción de conocimiento, constituyéndose en una oportunidad de aprendizaje situada y contextualizada.

De esta manera, la posibilidad de acreditar espacios curriculares mediante la participación en proyectos de investigación ofrece un marco institucional que legitima y potencia la formación por investigación, favoreciendo el desarrollo de competencias profesionales integrales. En el caso de la Ingeniería Industrial, el abordaje de problemáticas en el campo de la ESS no solo enriquece la práctica académica con aprendizajes técnicos y metodológicos, sino que además impulsa la construcción de un perfil profesional comprometido con los desafíos sociales y ambientales de la contemporaneidad.

Por lo tanto, la incorporación de estudiantes en proyectos de investigación se enmarca en la perspectiva de la investigación formativa, entendida como estrategia pedagógica que integra docencia e investigación y permite a los futuros profesionales construir aprendizajes significativos en escenarios auténticos, contemplando la importancia de los trayectos académicos de los participantes. La investigación formativa fortalece la articulación entre teoría y práctica, promoviendo el pensamiento crítico, el desarrollo de competencias metodológicas y la consolidación de una actitud investigadora (Parra, 2009). Desde esta perspectiva, los proyectos se convierten en espacios privilegiados para que los estudiantes transiten experiencias de indagación en contextos reales, participando activamente en procesos de diagnóstico, análisis y búsqueda de soluciones a problemáticas concretas. Para los estudiantes que se incorporan a este proyecto de investigación en particular, la experiencia representa una instancia de formación altamente transformadora, al permitirles desarrollar competencias técnicas al mismo tiempo en que se fortalecen habilidades blandas vinculadas a la comunicación, el trabajo colaborativo y la reflexión crítica sobre el rol social del ingeniero.

## 3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

A comienzos de 2024, cuatro estudiantes avanzados de la carrera de Ingeniería Industrial de FCEIA, UNR, se incorporaron como auxiliares al equipo de investigación del proyecto mencionado. Su incorporación se enmarcó en un proceso de selección que comenzó con una convocatoria en las aulas, complementada con difusión a través de las redes sociales oficiales de la Escuela de Ingeniería Industrial de FCEIA, UNR, con el objetivo de alcanzar a un público mayor. Posteriormente, se realizó una presentación del proyecto para informar sobre sus objetivos, metodología y alcance, así como para despertar el interés en los aportes de la Ingeniería Industrial al desarrollo de la Economía Social y Solidaria.

Los estudiantes interesados completaron un formulario de inscripción y participaron en entrevistas personales orientadas a conocer sus motivaciones y expectativas. Esta instancia permitió identificar sus áreas de interés y nivel de compromiso, al tiempo que facilitó la construcción de un primer vínculo entre el equipo de investigación y los nuevos auxiliares. Finalmente, todos los postulantes fueron aceptados.

Las tareas a realizar por los estudiantes se organizaron en torno a tres grandes ejes: revisión bibliográfica, relevamiento de datos y diseño metodológico. La revisión bibliográfica consiste en rastrear, reseñar y categorizar la literatura existente sobre el tema de estudio específico. Esta técnica es fundamental para lograr una visión panorámica de una determinada área del saber y se constituye en una exploración inicial rigurosa de los enfoques, tendencias y problemas presentes en el objeto de estudio, permitiendo al investigador conocer el estado del arte del área (Parra, 2009).

En 2023, el grupo de investigación ya había realizado esta revisión orientada al primer objetivo específico de reconocer y caracterizar a los actores que integran la ESS en la región. Este análisis facilitó la identificación de oportunidades para adaptar y aplicar herramientas propias de la Ingeniería Industrial (Viri et al., 20254).

Para los estudiantes auxiliares, dicha revisión constituyó el punto de partida: trabajaron con materiales teóricos y normativos sobre la ESS y el cooperativismo, incluidos sus marcos legales, evolución histórica y manifestaciones regionales, compilados en la actividad del año anterior. Así, se niveló el conocimiento del grupo, se consolidó una base conceptual robusta y se facilitó la identificación y la comprensión de los elementos distintivos de estas organizaciones.

Reconociendo la complejidad y diversidad de formas que adopta ESS, y tras deliberaciones grupales en las que los estudiantes participaron activamente, se decidió acotar el universo de estudio a las cooperativas para avanzar hacia la etapa de relevamiento. La decisión se fundamentó en criterios como el grado de organización, la escala de producción, el nivel tecnológico, la complejidad productiva y la forma jurídica definida, atributos que, en principio, favorecen la aplicación de herramientas de la Ingeniería Industrial. La delimitación geográfica se estableció en el Departamento Rosario, zona que abarca el proyecto (Viri et al., 2025)

Con el universo definido, parte del equipo de investigación, inclusive estudiantes, procedió a construir una base de datos compuesta por 943 cooperativas activas del Departamento Rosario, utilizando como punto de partida el padrón del Instituto Nacional de Asociativismo y Economía Social (INAES). A continuación, se llevó a cabo un proceso sistemático de depuración y enriquecimiento de los registros mediante una revisión manual de fuentes públicas, como constancias de inscripción en la Administración Federal de Ingresos Públicos (AFIP), redes sociales, sitios web institucionales y medios locales, con el objetivo de validar y complementar la información de cada cooperativa.

Con una visión global de las cooperativas del Departamento Rosario y considerando el perfil del Ingeniero Industrial junto con la disponibilidad de recursos económicos y accesibilidad, se definió un segundo recorte: se concentró exclusivamente en las cooperativas de trabajo de la ciudad de Rosario cuya actividad principal es la industria manufacturera. Sobre ese subconjunto se avanzó en el diseño de un instrumento de recolección de datos, un cuestionario, orientado a relevar información específica sobre procesos productivos, acceso a capacitaciones y asistencia técnica, formas de organización interna, sostenibilidad económica y vínculo con los principios cooperativos.

La elaboración del cuestionario se realizó de manera participativa durante un taller (workshop) con todo el equipo. En primera instancia, y respetando los criterios metodológicos básicos, se definieron los objetivos del instrumento, y a continuación se estructuró el cuestionario en bloques temáticos y se redactaron y categorizaron los ítems.

Este proceso implicó, además, el aprendizaje de adaptar el lenguaje técnico de la Ingeniería Industrial a un lenguaje accesible para el sector cooperativo, priorizando la claridad y comprensión de las preguntas a fin de mejorar la calidad de las respuestas.

Complementariamente, los estudiantes participaron de una jornada de visitas a cooperativas en la localidad de Pérez, organizada en el marco de la Semana de la ESS. Estas salidas permitieron el contacto directo con los espacios de trabajo, procesos productivos y las dinámicas organizativas de organizaciones autogestionadas en los rubros de alimentación, reciclaje y cultura, aportando una comprensión más vivencia! de los desafíos y oportunidades que estas enfrentan.

En términos académicos, se destaca la participación de dos de los estudiantes como coautores de un trabajo presentado en las XVI Jornadas Nacionales de Investigadores/as en Economías Regionales, lo que contribuyó a familiarizarse con el vocabulario, la estructura y los formatos propios de la escritura científica.

Finalmente, la redacción de un informe en el que dieran cuenta de las actividades realizadas, los aprendizajes y reflexiones sobre la experiencia, ofreció a los estudiantes la oportunidad de integrar y sintetizar los conocimientos y habilidades desarrolladas en el marco del proyecto.

### 3.1 Testimonios estudiantiles sobre la experiencia formativa

Con el objetivo de valorar la experiencia de iniciación en investigación desde la perspectiva de los participantes, a continuación se presentan fragmentos literales de sus informes finales. Estos testimonios ofrecen una visión vivencia! y auténtica, expresada en sus propias palabras, y contribuyen a profundizar la comprensión del impacto formativo de los proyectos de investigación en la carrera de Ingeniería Industrial.

> *" ...fue una etapa formativa integral que complementa mi formación como Ingeniero Industrial al incorporar una visión humanista y social* a *los conocimientos técnicos aprendidos* a *lo largo de la carrera. Haber tenido la posibilidad de formar parte, sin duda, ha sido extremadamente fructífero para mi desarrollo como profesional y persona...".* (Estudiante A, comunicación personal, diciembre 2024).

> *" ...haber participado en este proyecto significó un crecimiento tanto en mi desarrollo personal como profesional. Por un lado, aprendí y me interioricé en todo lo que respecta* a *la Economía Social y Solidaria y cooperativas, así como su vinculación con la sociedad y con la Ingeniería Industrial...".* (Estudiante B, comunicación personal, diciembre 2024).

> *" ...informarnos, leer, debatir y redactar sobre y para cooperativas me dió un enfoque sobre un tópico nunca antes abordado que viene* a *sumar un pilar más social y blando* a *nuestra formación más técnica como Ingenieros Industriales. Conocer gente del rubro y ver la manera en la que trabajan no solo resultó inspirador sino que nos sumó un punto de vista de situaciones* o *abordajes que estábamos pasando por alto, fue muy productivo y reflexivo para la tarea final del año, el armado del cuestionario. A modo de conclusión, con esta experiencia gané formación en una nueva temática, herramientas de redacción, búsqueda y síntesis de información y* a *mi criterio lo más importante, el trabajo en equipo y el pensamiento crítico desarrollado para plasmar en palabras claras y con un fin determinado, nuestras ideas ...".* (Estudiante C, comunicación personal, diciembre 2024).

> *" ...fue una gran oportunidad para aprender y crecer. Por un lado, fortalecimos habilidades como el trabajo en equipo, la comunicación efectiva y la organización. Por otro lado, adquirimos experiencia práctica en la creación y análisis de cuestionarios, una herramienta valiosa en el ámbito de la Ingeniería Industrial. Además, logramos aplicar conocimientos teóricos en un contexto real, vinculando la ingeniería con la Economía Social y Solidaria, un área que tiene mucho potencial para explorar y desarrollar.".* (Estudiante D, comunicación personal, diciembre 2024).

## 4. RESULTADOS Y APRENDIZAJES

La experiencia desarrollada demostró ser altamente formativa en múltiples dimensiones, permitiendo a los estudiantes fortalecer competencias metodológicas, transversales y sociales esenciales para su formación profesional.

**Competencias metodológicas robustas**
Se consolidaron habilidades fundamentales en el análisis de datos, la gestión de la información y la estructuración de bases de datos.

**Gestión integral de procesos investigativos**
Los estudiantes adquirieron capacidad para planificar de modo completo los procesos de investigación, desde el diseño de instrumentos de recolección de datos como los cuestionarios hasta la sistematización de información compleja.

**Trabajo colaborativo y construcción compartida del conocimiento**
Se fortalecieron significativamente las competencias para el trabajo en equipo y la escucha activa. Mediante el debate, el contraste de ideas y la reflexión colectiva, se logró una comprensión compartida del objeto de investigación.

**Actitud crítica y exploratoria reforzada**
Se reforzó una postura crítica y exploratoria, ya que los estudiantes se sintieron motivados a descubrir, cuestionar, reinventar y construir conocimiento de manera autónoma

**Dimensión humanista y compromiso social**
Los estudiantes profundizaron en la comprensión de "otra economía", reconociendo el rol esencial de las cooperativas como agentes de cambio social y económico. Este enfoque permitió integrar una perspectiva humanística y de compromiso social a su formación técnica.

**Potencial transformador de la Ingeniería Industrial en la ESS**
Se visibilizó el potencial de la Ingeniería Industrial para fortalecer organizaciones de la ESS, valorando el trabajo colectivo, la solidaridad y los principios éticos en el ámbito profesional.

## 5. CONCLUSIONES

La experiencia desarrollada confirma que los proyectos de investigación constituyen espacios formativos de gran valor para estudiantes de Ingeniería Industrial. En este caso, trabajar en torno a la ESS permitió articular lo técnico y lo metodológico, fortaleciendo el perfil profesional con pensamiento crítico, compromiso ético y una visión sensible de la realidad.

En cuanto a la formación metodológica y técnica, se consolidaron competencias fundamentales en análisis de datos, planificación de investigaciones y diseño de herramientas, como cuestionarios, fortaleciendo la capacidad de sistematizar información compleja con rigor y precisión.

Respecto del desarrollo de habilidades interpersonales y críticas, se potenció el trabajo en equipo, la escucha activa y el aprendizaje colaborativo, promoviendo una actitud autónoma orientada a descubrir, cuestionar y construir conocimiento.

Al integrar un enfoque social y humanista con los saberes técnicos, se evidenció la potencialidad del Ingeniero Industrial para generar impactos positivos en la comunidad mediante proyectos orientados al bien común, reafirmando el vínculo entre la profesión y la construcción de una sociedad más solidaria.

En definitiva, la participación estudiantil en proyectos de investigación en el contexto del cooperativismo en Rosario, reconocida como espacio curricular electivo en el trayecto académico, resultó una estrategia eficaz para integrar saberes técnicos, metodológicos y críticos en un marco social y humanista. Esta modalidad ofrece trayectos formativos flexibles, alineados con intereses individuales, y favorece una formación más contextualizada, reflexiva y comprometida.

Por lo tanto, promover la investigación formativa enriquecida con enfoques sociales puede transformar la manera en que los futuros ingenieros conciben su rol profesional, formando egresados capaces de liderar cambios significativos hacia una sociedad más justa, equitativa y solidaria.

## 6. REFERENCIAS

Novillo Martinez, Elena (2015). *La Economía Social y Solidaria: una economía para las personas.* Revista Economistas nº22, editada por el Consejo General de Economistas. Madrid, España.

Organización Internacional del Trabajo. (2022, 27 de mayo-11 de junio). *Resolución relativa al trabajo decente y la economía social y solidaria* [Resolución 11]. Conferencia Internacional del Trabajo, 11O.ª reunión, Ginebra, Suiza.

Parra, C. (2009). Apuntes sobre la investigación formativa. *Educación Y Educadores,* 7, 57-77. Recuperado a partir de https://educacionyeducadores.unisabana.edu.co/index.php/eye/article/view/549

Toscano, J., Morí, C. & Massacesi, M. (2024). *Reflexión sobre el perfil de la Ingeniería Industrial y la Economía Social Y Solidaria en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional De Rosario.* Ponencia presentada en V Jornadas Nacionales de Ingeniería y Sociedad, Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional. 23 y 24 de mayo de 2024, Bahía Blanca.

Universidad Nacional de Rosario (2018). Resolución Nº 996. *Por la cual se establece aprobar el Procedimiento para la Acreditación de Espacios Curriculares Electivos.* Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.

Universidad Nacional de Rosario (2024). Resolución Nº 753. *Por la cual se establece la creación de espacios curriculares flexibles X" para los planes de estudio 2014 de las carreras de ingeniería.* Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.

Viri, M., Toscano, J., Bengoechea, B., & Rouillon, E. J. (2025). *Integración de la Ingeniería Industrial y la Economía Social y Solidaria: Un enfoque metodológico para el relevamiento y estudio de cooperativas en Rosario y alrededores.* En l. L. García (Comp.), *Actas de las XVI Jornadas Nacionales de Investigadorxs en Economías Regionales* (pp. 864-874). Dryes CEUR-CONICET.

# VÍNCULOS ENTRE FORMACIÓN ACADÉMICA Y PRÁCTICA PROFESIONAL: REFLEXIONES SOBRE LAS COMPETENCIAS DE EGRESO

Gómez, Daniela; Cerrano, Marta Liliana; Gallegos, María Laura; Cinalli, Marcelo;

*Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario*
*Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional San Nicolás*

*danielag@fceia.unr.edu.ar*
*mcerrano@fceia.unr.edu.ar*
*mgallegos@frsn.utn.edu.ar*
*mcinalli@frsn.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

En el marco del Proyecto de Investigación “Competencias de Egreso en Ingeniería Industrial: desafíos de acercar el futuro profesional al contexto actual y a las necesidades de la sociedad de modo flexible ante los cambios”, radicado en la Escuela de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario se realizó una encuesta a estudiantes con el objetivo de relevar la percepción de los mismos sobre las habilidades, vivencias y competencias evidenciadas en el desarrollo de la práctica profesional supervisada.
Se empleó un enfoque empírico y exploratorio, utilizando la investigación acción. Uno de los principales objetivos de este estudio fue recabar información que permitiera reflexionar y detectar fortalezas y debilidades en el conjunto de competencias de egreso —tanto genéricas como específicas— desarrolladas a lo largo de la carrera, con especial énfasis en el espacio curricular de las Prácticas Profesionales Supervisadas.
A partir de los resultados obtenidos, fue posible establecer vínculos entre ciertas competencias y los procesos de enseñanza y aprendizaje. En particular, se identificaron aspectos susceptibles de mejora y adaptaciones, con el propósito de avanzar hacia un perfeccionamiento continuo del saber y del ser en la formación profesional.

**Palabras Claves:** Práctica Profesional Supervisada, Competencias de Egreso, Ingeniería Industrial

**ABSTRACT**

Within the framework of the research project "Graduate Competencies in Industrial Engineering: Challenges of adapting the professional future to the current context and to the needs of society in a flexible manner in the face of change," based at the School of Industrial Engineering of the Faculty of Exact Sciences, Engineering, and Surveying of the National University of Rosario, a survey was conducted among students to assess their perceptions of the skills, experiences, and competencies demonstrated during their supervised professional internship.
An empirical and exploratory approach was used, utilizing action research. One of the main objectives of this study was to gather information that would allow for reflection and identify strengths and weaknesses in the set of graduate competencies—both generic and specific—developed throughout the program, with special emphasis on the curricular area of Supervised Professional Internships.
Based on the results obtained, it was possible to establish links between certain competencies and the teaching and learning processes. In particular, aspects susceptible to improvement and adaptation were identified, with the aim of moving toward continuous improvement of knowledge and being in vocational training.

**Keywords:** Supervised Professional Practice, Graduation Competencies, Industrial Engineering

## 1. INTRODUCCIÓN

Un grupo de docentes investigadores dentro del Proyecto de Investigación “Competencias de Egreso en Ingeniería Industrial: desafíos de acercar el futuro profesional al contexto actual y a las necesidades de la sociedad de modo flexible ante los cambios”, radicado en la Escuela de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario realizó una encuesta a estudiantes con el objetivo de relevar la percepción de los mismos sobre las habilidades, vivencias y competencias evidenciadas en el desarrollo de las Prácticas Profesionales Supervisadas (PPS).

Las PPS tienen como propósito principal brindar a los estudiantes una experiencia directa del ejercicio profesional, permitiéndoles aplicar en contextos reales los saberes teóricos y prácticos adquiridos a lo largo de su formación académica. Esta instancia formativa busca establecer un vínculo concreto entre el ámbito educativo y el mundo laboral. Para cumplir con los requisitos académicos de estas prácticas, los alumnos deberán realizar un mínimo de 200 horas de actividades correspondientes en diversos tipos de organizaciones.

Este trabajo está basado en un análisis realizado en la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás, donde se muestra el funcionamiento de una plataforma autogestionable para PPS (Gallegos et al, 2021).

## 2. MARCO TEÓRICO

Las modificaciones en el mundo del trabajo, los procesos de gestión de la información y de producción de conocimientos, los modos de gestionar y de investigar, la inteligencia artificial, requieren de profesionales altamente preparados, flexibles y versátiles ante los cambios; dotados de conocimientos, habilidades, destrezas, aptitudes (Cerrano et al 2021). La Universidad no está ajena a las exigencias globales, signada por la evolución tecnológica y social y su internacionalización en todos los ámbitos de su actividad (ANECA, 2013). Desde el año 2001 tanto la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU, 2001) (CONEAU,2005), como el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la República Argentina manifiestan la necesaria revisión general de la enseñanza de la Ingeniería para adecuar la misma a los avances científicos, tecnológicos y los cambios en los esquemas económicos, productivos y sociales, ocurridos en los últimos años en nuestro país y en el mundo. Luego de debates e intercambios, en el año 2006 CONFEDI, (CONFEDI, 2006) aprobó las competencias genéricas para todas las ramas de la ingeniería, las que fueron aceptadas por la Asociación Iberoamericana de Instituciones de Enseñanza de la Ingeniería en la Declaración de Valparaíso (ASIBEI) y en 2017 las competencias específicas de cada titulación. En este año, CONFEDI elaboró la propuesta que fue aprobada por la Asamblea General de ASIBEI que contiene acciones en cuatro de los Ejes Temáticos de la Conferencia Regional de Educación Superior (CRES) 2018 los cuales son: internacionalización e integración regional de América Latina y el Caribe; la Educación Superior como parte del sistema educativo en América Latina y el Caribe; el papel estratégico de la Educación Superior en el desarrollo sostenible de América Latina y el Caribe; la investigación científica y tecnológica y la innovación como motor del desarrollo humano, social y económico para América Latina y el Caribe (ASIBEI ,2013). En 2018, CONFEDI aprobó el “Libro Rojo”, (CONFEDI, 2018), que contiene los nuevos estándares que constituyen un hito de singular trascendencia para la Educación en Ingeniería en Argentina ya que incorpora el enfoque de las competencias profesionales como organizador de la tarea educativa. Asimismo, cabe recordar la Res.1254/18 del Ministerio de Educación que introdujo algunos cambios en las actividades reservadas (MECyT, 2018). En la Res.1543/21 (MECyT, 2021) sobre estándares para la acreditación de las carreras de Ingeniería Industrial señalan a la Práctica Profesional Supervisada y al Proyecto Integrador “como espacios de formación práctica que constituyen una oportunidad de aplicación e integración de conocimientos y competencias a efectos de resolver problemas de ingeniería”. El proceso de mejora continua también aplica a las universidades y facultades, la Comisión Nacional de Enseñanza y Acreditación Universitaria (CONEAU) con la fijación de estándares para la acreditación de carreras, la adecuación de los Planes de Estudio y la ampliación del campo de actuación de la investigación a las actividades de vinculación y transferencia. Esto conlleva a la necesidad de un currículum con un balance equilibrado de competencias y conocimientos académicos, científicos, tecnológicos y de gestión. En el contexto citado, las universidades se constituyen en protagonistas del desarrollo económico y social promoviendo la innovación a través de procesos sociales (Dimeglio et.al., 2012). Las necesidades actuales interpelan a los distintos actores a repensar sus funciones y relaciones. En un mundo tecnológico globalizado, modificado permanentemente y con ciclos de innovación cada vez más cortos, la universidad comienza a revisar sus procesos formativos, con la mirada en los profesionales que egresan, y el perfil formativo que desarrollan. Para garantizar que los estudiantes logren un desempeño eficiente en su profesión deben

poder demostrar no solo un “saber”, sino un "saber estar" y un “saber hacer” y más aún un “saber ser” (Echeverría Samanes, 2002) en el transcurso de la práctica en una organización. Concretamente, un graduado de ingeniería deberá poseer un balance equilibrado de conocimientos académicos, científicos, tecnológicos y de gestión, con formación humanística, en la cual considere aspectos políticos, económicos, sociales, ambientales y culturales con una perspectiva global, desde las necesidades y el aporte de la profesión a la sociedad.
Benegas (Benegas et al, 2024) alega que el futuro de la educación en ingeniería está estrechamente vinculada a los avances tecnológicos y las necesidades cambiantes de la industria 5.0. La Industria 4.0 generó una nueva revolución industrial combinando técnicas avanzadas de manufactura con nuevas tecnologías digitales para incrementar la productividad, reducir la participación humana y consecuentemente, impulsar la competitividad e identifican que estos nuevos procesos inteligentes tienen aún limitaciones y que requieren de la supervisión del ser humano, de tal forma que estos dos elementos no pueden ser considerados independientes, sino complementarios. Mencionan que, además de las cualificaciones académicas y el conocimiento técnico y teórico, cada vez más las habilidades blandas, revelan una mayor importancia para la industria y las empresas, especialmente aquellas que demuestran la capacidad de toma de decisiones complejas.
Docentes que pertenecen al grupo de investigación han realizado un trabajo de reflexión sobre las competencias de egreso en los Proyectos Finales de Ingeniería (Gómez, et al. 2021). En dicha publicación, se analizó una muestra de Tesis con el fin de usar la información obtenida para reflexionar y adecuar aquello que fuera necesario transformar y resignificar, favoreciendo “el saber hacer” y el “saber ser” en los estudiantes de Ingeniería Industrial.
A su vez, un grupo de auxiliares alumnos de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás y que pertenecen al equipo de investigación están estudiando entre sus pares, la percepción que los mismos tienen en cuanto al desempeño profesional y las competencias de egreso (Parra et al, 2024).
La práctica profesional supervisada -PPS- es uno de los requisitos curriculares incorporados a los Planes de Estudio, como exigencia académica definida previamente para la acreditación de las carreras de Ingeniería (Villanueva, 2008). Este requisito prevé el desarrollo de 200 horas en un ámbito profesional que pueden discurrir en diversos tipos de organizaciones, tutelados por un docente y un referente donde se realiza la actividad. La PPS se rige por Resolución Ministerial Nº 1232/01 (MECyT, 2001), la cual fija en su Anexo III, como uno de los estándares para la acreditación de las Carreras de Ingeniería la exigencia de acreditación de un mínimo de 200 horas de prácticas que todo estudiante debe cumplir a fin de obtener la titulación de Ingeniero.
La situación descrita generó la inquietud de indagar si el camino por el que se está transitando en las actividades de PPS es el adecuado, qué modificaciones y ajustes se podrían considerar, así como qué elementos potenciar.

## 3. DESARROLLO

### 3.1 Metodología y Objetivo

Se ha trabajado utilizando como estrategia la investigación-acción, que se desarrolla siguiendo un proceso en espiral que incluye cuatro fases: Planificación, Acción, Observación y Reflexión. El enfoque metodológico empleado para realizar el desafío propuesto fue empírico y exploratorio. Para ello se utilizó la encuesta como técnica de recolección de datos primarios, que es apropiada para obtener opiniones, creencias o actitudes de un número significativo de personas. Se diseñó como instrumento, un cuestionario semi-estructurado en formato electrónico, que fue enviado por mail a los alumnos que habían realizado las PPS de la carrera Ingeniería Industrial de FCEIA - UNR, en el periodo bajo estudio. Se ha tomado como antecedente el formulario que se ha utilizado oportunamente en la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás.
El objetivo principal consiste en relevar y analizar en profundidad la percepción de los estudiantes acerca de las habilidades adquiridas, las experiencias vividas y las competencias desarrolladas durante el proceso de la práctica profesional supervisada. Este propósito busca no solo identificar los aprendizajes técnicos y disciplinares alcanzados, sino también reconocer aquellos aspectos vinculados al crecimiento personal, la interacción con el entorno laboral y la capacidad de aplicar los conocimientos teóricos en situaciones reales de la profesión. Asimismo, se pretende indagar en el grado de satisfacción de los alumnos respecto a la práctica, así como en las oportunidades de mejora que esta experiencia ofrece para fortalecer su formación integral como futuros profesionales.

### 3.2 Resultado de las encuestas

Los resultados que se presentan son de un relevamiento realizado a 98 alumnos que habían concluido sus Prácticas Profesionales Supervisadas entre los años 2024 y mitad del 2025.
En primer lugar, se preguntó cómo había encontrado una organización para realizar sus PPS, el 40% respondió que la encontró realizando búsquedas personales, el 25% las ofreció el área de pasantías de FCEIA, el 15% el área de pasantías de UNR y otro 15% contestó que fue contactado por un compañero o docente. Muy pocos alumnos fueron contactados directamente por una organización.




*Figura 1 Oportunidad de PPS*

En cuanto al ámbito de realización de las PPS, el 55% de los encuestados las realizó en una empresa grande y/o multinacional, el 25% en una Pyme, el 15% en organizaciones públicas y el resto en la propia facultad, donde hay un espacio para que los alumnos puedan realizar sus PPS.

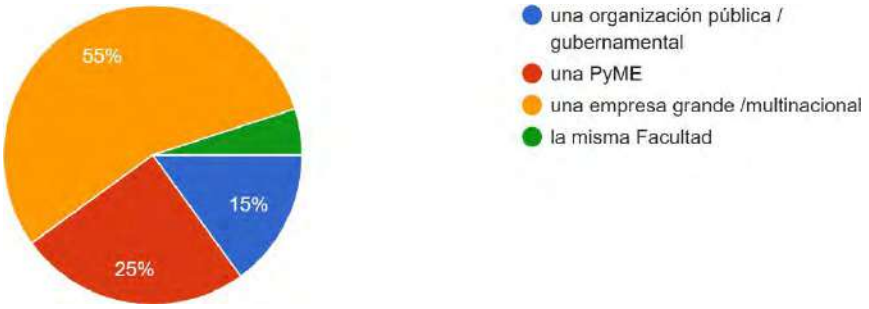



*Figura 2 Tipo de Organización*

Cabe aclarar que el 65% de los encuestados tuvo su primer contacto en el ámbito laboral con las PPS. Con respecto al horario en el que realizaban las PPS, el 45% era de modalidad híbrida (presencial y home office), el 20% era pautado por la organización y el 35% restante era flexible de modo que el estudiante podía adecuar los horarios a sus otras actividades, en especial, el cursado de algunas materias.

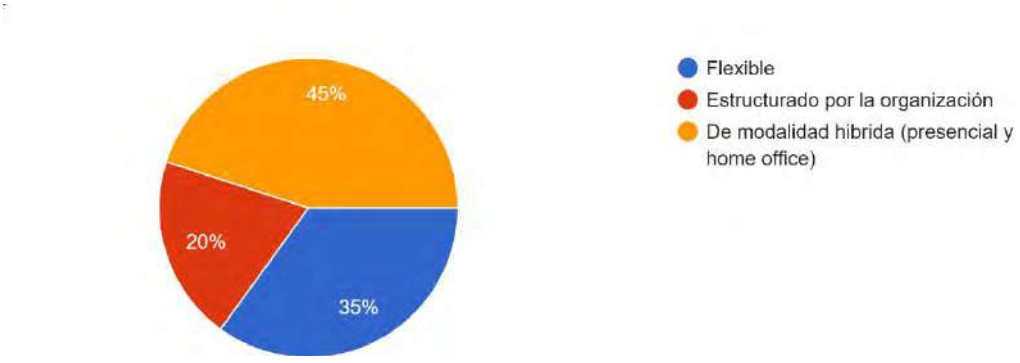



*Figura 3 Horario en el que los estudiantes realizaban las PPS*

También se le preguntó a los encuestados sobre cómo fue la experiencia de integración al grupo organizacional. Para esto se usó una escala del 1 al 5 donde 1 era difícil y controvertida y 5 fácil y rápida. El 35% otorgó a esta pregunta una valoración de 5, el 30% un valor de 4, otro 30% valoró con 3 y solo un 5% dijo que había sido muy difícil, otorgando una valoración de 1.
Con respecto a los beneficios que obtuvieron en la realización de las PPS, pregunta en la cual podían elegir varias opciones, se les preguntó específicamente sobre: desarrollo de habilidades, networking, aplicación de conocimientos obtenidos en la carrera, oportunidad laboral, aprendizajes académicos nuevos, u otro beneficio que consideran habían obtenido y el resultado fue el siguiente:

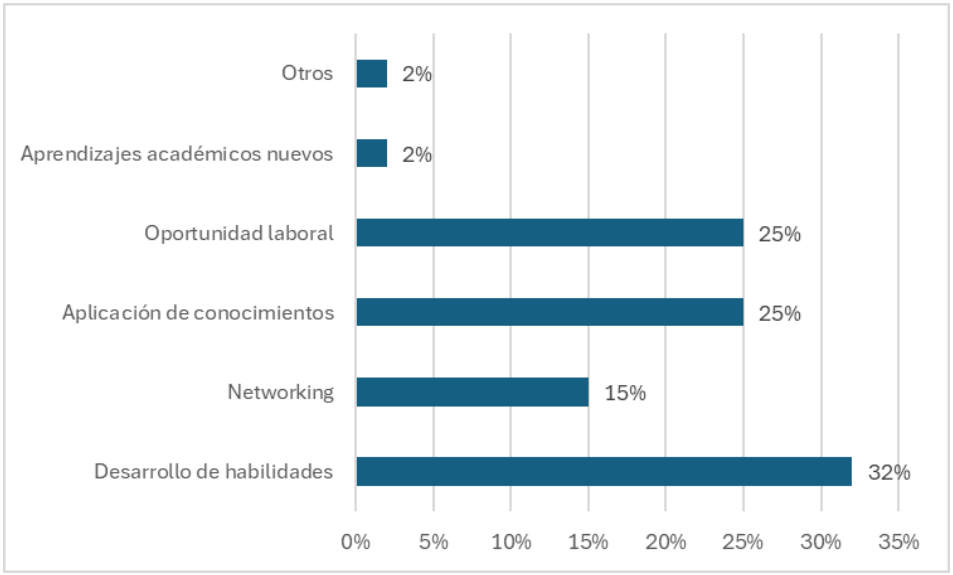



*Figura 4 Beneficios percibidos*

Como muestra la figura 4, muchos estudiantes destacan que desarrollaron nuevas habilidades, en segundo lugar, están tanto la oportunidad de insertarse en el mundo laboral y la aplicación de conocimientos adquiridos en la carrera y en tercer lugar el desarrollo de la capacidad para establecer y mantener relaciones profesionales y personales con el objetivo de intercambiar información, recursos y oportunidades. Además, algunos encuestados agregaron que aprendieron de procesos productivos y dinámicas laborales.
Finalmente, se les invitó a que valoren su experiencia en las PPS, en una escala de 1 a 5, siendo 1 *Poco valiosa* y 5 *Muy valiosa*. Los resultados se muestran en la siguiente figura.

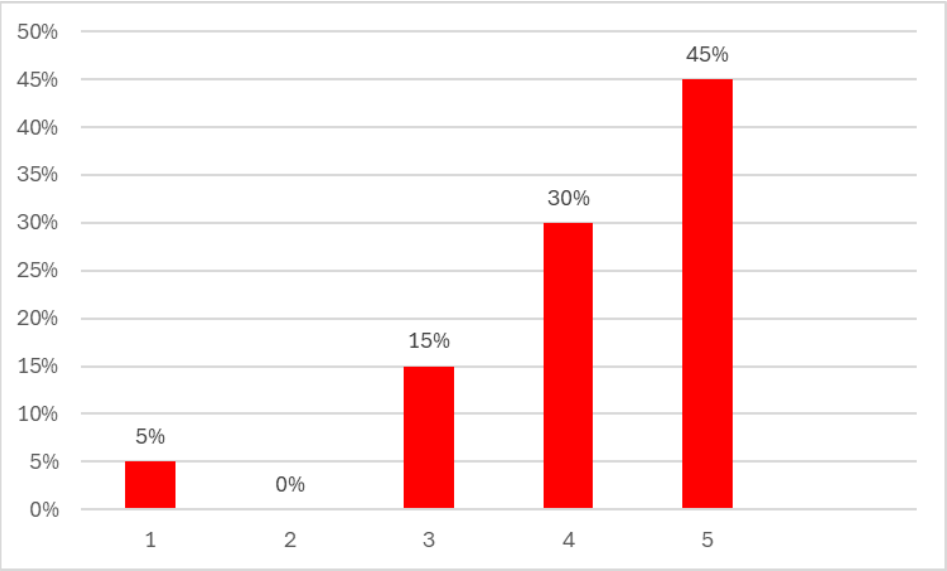



*Figura 5 Valoración de la experiencia de PPS*

Como se puede observar, el 75% de los encuestados consideraron valiosa la experiencia en las PPS. Se les pidió que, en función de lo que habían aprendido en la carrera, enumeren con dos palabras qué conceptos, prácticas, temas, consideran que fueron FORTALEZAS dentro de las PPS.
Según la respuesta de los encuestados, se encontró que en las PPS pudieron desarrollar habilidades agrupadas en diferentes categorías:

- **Gestión y Organización** (ej. planificación, programación, optimización)
- **Habilidades personales** (ej. autonomía, comunicación fluida, aprendizaje rápido)
- **Procesos y Producción** (ej. mejoras de procesos, procesos productivos)
- **Tecnología y Datos** (ej. análisis de datos, lógica)
- **Relaciones Humanas** (ej. relaciones humanas, trabajo en equipo)

Otra de las preguntas realizadas indagó acerca de qué DIFICULTADES tuvieron al realizar las PPS. La mayoría de las respuestas rondaban en el temor a equivocarse, como así también en el proceso de adaptación que experimenta quien ingresa a una organización y debe afianzar la comunicación con personas que hace mucho tiempo están en el lugar de trabajo. Algunos encuestados mencionaron que al principio tenían dudas sobre cómo aplicar lo aprendido en la facultad en la práctica laboral y el temor a no ser capaces de aprender cosas nuevas.
Al consultarles sobre los espacios curriculares que más usaron en las PPS, los alumnos que forman parte de esta muestra en particular, respondieron según la información mostrada en el siguiente gráfico:

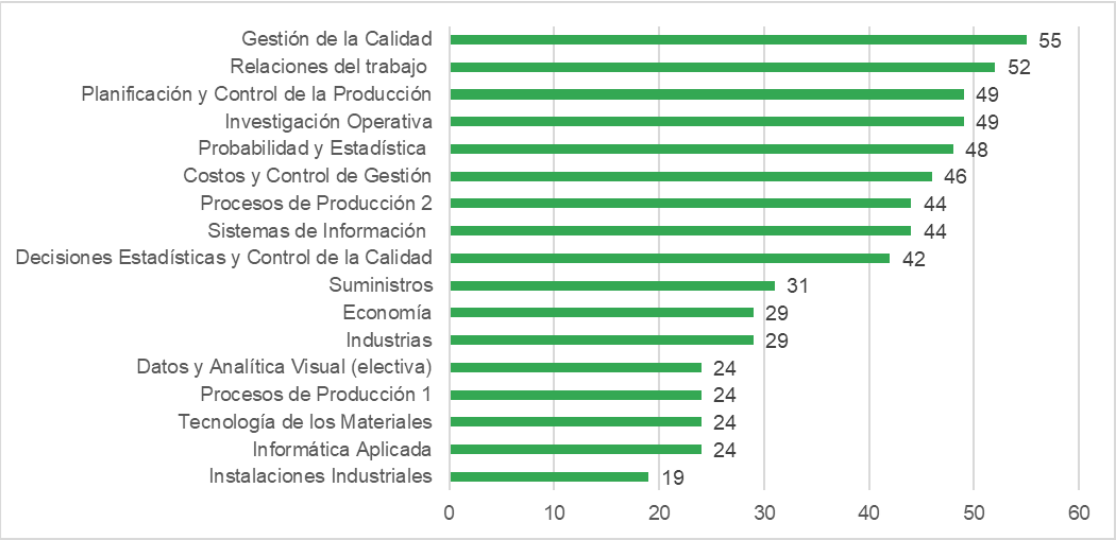



*Figura 6 Cantidad de alumnos que utilizaron los espacios curriculares en las PPS*

Como puede observarse, Gestión de la Calidad y Relaciones del Trabajo son los espacios más utilizados por los estudiantes que hicieron las PPS (según esta muestra), seguidos por Planificación y Control de la Producción, Costos y Control de Gestión, Investigación Operativa, Procesos de Producción 1 y 2, entre otras. Cabe aclarar que un buen número de alumnos utilizaron una materia electiva: Datos y Analítica Visual.
Por último, se les preguntó qué competencias de egreso (según el Libro Rojo) perciben que habían desarrollado íntegramente o en parte, en las PPS. Los encuestados podían elegir más de una opción posible. A continuación se describen las mismas junto con un gráfico con las respuestas seleccionadas.

1.1. Diseñar, proyectar, calcular, modelar y planificar las operaciones y procesos de producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios).
1.2. Diseñar, proyectar, especificar, modelar y planificar las instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios).
1.3. Formular y evaluar proyectos públicos y privados de desarrollo.
2.1. Dirigir, gestionar, optimizar, controlar y mantener las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios)
2.2. Evaluar la sustentabilidad técnico-económica y ambiental de las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios).
3.1. Gestionar y certificar el funcionamiento, condiciones de uso, calidad y mejora continua de las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios)
4.1. Proyectar, dirigir y gestionar las condiciones de higiene y seguridad en las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios)
4.2. Gestionar y controlar el impacto ambiental de las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios).

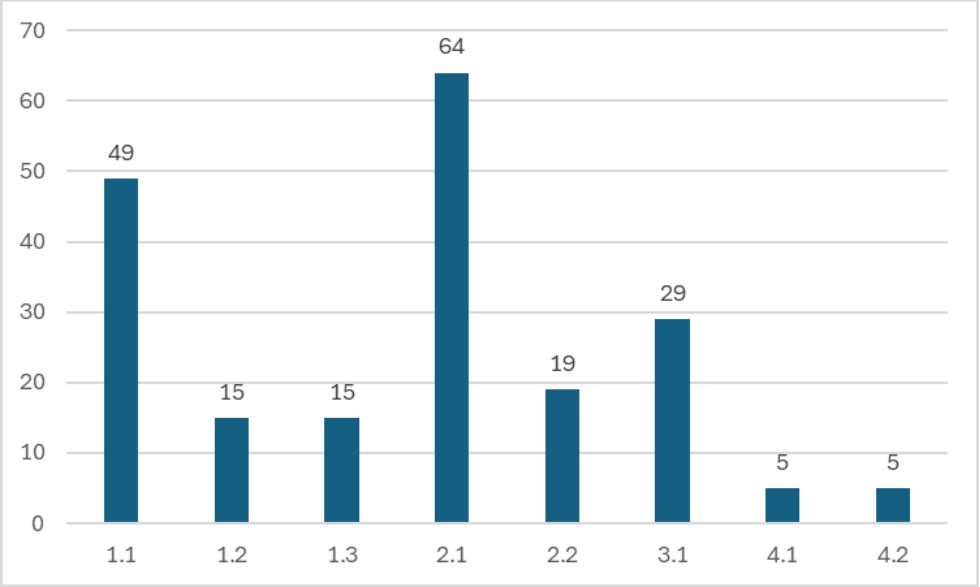



*Figura 7 Competencias de egreso específicas desarrolladas en las PPS (cantidad de alumnos)*

Se puede observar que la competencia específica de egreso que los encuestados percibieron que más desarrollaron fue la *2.1. Dirigir, gestionar, optimizar, controlar y mantener las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios)*, seguida por la 1.1 *Diseñar, proyectar, calcular, modelar y planificar las operaciones y procesos de producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios).*

## 4 CONCLUSIONES

Las Prácticas Profesionales Supervisadas (PPS) dentro de la carrera de Ingeniería Industrial constituyen una componente destacada en la formación académica, ya que permiten articular los saberes adquiridos en la universidad con los desafíos reales que plantea el ámbito profesional. Los resultados proporcionados por la encuesta brindan una medida de la pertinencia de la formación, ofreciendo información tanto del aporte académico como de la vinculación con las organizaciones del entorno social, económico y laboral; desde sus diferentes bloques de acción: la gestión y Organización, (que concentra la planificación, la programación y la optimización), la Producción y los Procesos (que incluye mejoras de procesos productivos, industriales y de servicios), la Tecnología y gestión de Datos (desde el procesamiento y análisis, la lógica y soluciones) y en la práctica como la autonomía, comunicación efectiva, el autoaprendizaje y la responsabilidad profesional.

En lo estrictamente académico, las PPS representan una oportunidad concreta para que los estudiantes pongan en juego los conocimientos teóricos adquiridos durante la carrera, al tiempo que permiten identificar con claridad cuáles son las fortalezas consolidadas y las dificultades que aún requieren mayor atención. En este sentido, la práctica se constituye en un espacio de retroalimentación valiosa para la universidad, y para docentes de la carrera, ya que facilita el relevamiento relevar de las competencias de egreso efectivamente desarrolladas y permite contrastarlas con las exigencias del mercado laboral. Además de la instancia de cumplimiento académico, cada estudiante puede monitorear y autoevaluarse durante las 200 horas exigidas de práctica, respecto a saberes específicos, procedimentales y actitudinales, considerando brechas y oportunidades.

Desde la perspectiva de la vinculación con las organizaciones, las PPS ofrecen un canal privilegiado para observar y analizar de manera directa métodos, procesos y relaciones que conforman la dinámica interna de empresas e instituciones. Esto no solo enriquece la mirada del estudiante, sino que también fortalece los lazos de cooperación entre la universidad y el medio, potenciando una formación más integral y contextualizada.

Asimismo, estas experiencias contribuyen a la formación de profesionales de la ingeniería industrial con mayor sentido crítico, capacidad de adaptación y sensibilidad frente a las necesidades del entorno social y productivo. En consecuencia, las PPS se consolidan no solo como una instancia de evaluación de competencias, sino también como un espacio de construcción de aprendizajes significativos y de generación de valor compartido.

**REFERENCIAS**


ANECA -Agencia Nacional de Evaluación y de la Calidad y Acreditación,(2013). *Guía de apoyo para la redacción, puesta en práctica y evaluación de los Resultados de Aprendizaje*. Madrid.

ASIBEI (2013) *Declaración de VALPARAISO sobre competencias genéricas de egreso del Ingeniero Iberoamericano*. Valparaíso.

BENEGAS, M., CAMBLONG, J. (2025). D*esafíos en la formación de ingenieros industriales en los albores de la industria 5.0.* AACINI - Revista Internacional De Ingeniería Industrial, 4(2), 32-46.

CERRANO, M; GALLEGOS, M.; FERABOLI, L; GALLEGOS, H.; RISETTO, M. (2021). *Experiencias, reflexiones y oportunidades sobre educación no presencial en Ingeniería Industrial*. Revista RADI N° 17, 49-56.

CONEAU (2001), *Aportes para la reformulación de la propuesta del CONFEDI documento de Traba*jo

CONFEDI (2005) P*royecto estratégico para la reforma curricular de las Ingenierías Santa Fe.*

CONFEDI (2006). *Competencias Genéricas. Desarrollo de competencias en la Enseñanza de la ingeniería Argentina*. Facultad de Ingeniería-UNSJ. San Juan.

CONFEDI (2018) *Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la República Argentina "LIBRO ROJO DE CONFEDI".*

DIMEGLIO, F; LÓPEZ BIDONE E. (2010). *Universidad-Sector Productivo ¿Una vinculación deseada? Contribuciones al proceso innovativo regional a partir de la Vinculación Universidad-Empresa. Caso de estudio: Polo Informático – UNICEN*. En Campos, Piñero, Figueroa (Coordinadores) Transformaciones recientes de las Universidades Latinoamericanas. Agendas y actores en la producción de conocimiento. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

ECHEVERRÍA SAMANES, B. (2002). *Gestión de la competencia de Acción Profesional.* Revista de Investigación Educativa, 20(1), 7-43.

GALLEGOS, M.; CINALLI, M.; BÁRBARO, L. (2021*). Cursado, seguimiento y autoevaluación en Práctica: Resultados de uso de plataforma autogestionable para PPS.* Libro actas COINI 2021: XIV Congreso Internacional de Ingeniería Industrial, Buenos Aires.

GÓMEZ, D.; GUZMÁN, E.; STAGNITTA, V; TOSCANO, J. (2021). *Proyecto Final de Ingeniería Industrial. Descripción, Proceso y Análisis de la tributación de competencias específicas*. Libro actas COINI 2021: XIV Congreso Internacional de Ingeniería Industrial, Buenos Aires.

MECyT - Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología (2001) Resolución Ministerial Nº 1232/01

MINISTERIO DE EDUCACIÓN (2018). Resolución 1254. Actividades Profesionales reservadas al título de Ingeniero Industrial. Buenos Aires, Argentina.

MINISTERIO DE EDUCACIÓN (2021). Resolución 1543. Estándares para la Acreditación - Ingeniero Industrial Anexo IV. Buenos Aires, Argentina.

PARRA, P.; MUÑOZ, L.; KOZICKI, L.; CINALLI, M.; GALLEGOS, M.; GÓMEZ, D.; SALGUERO, M. (2024). *Competencias de egreso y desempeño profesional en Ingeniería Industrial. Desafíos actuales.* Libro de resúmenes de Jornadas de ciencia, tecnología e innovación 2024 (Jornadas CTeI 2024)

VILLANUEVA, Ernesto (2008). *La acreditación en contexto de cambio: el caso de las carreras de ingeniería en la Argentina.* Avaliação, Campinas; Sorocaba, SP, v. 13, n. 3, p. 793-805, nov.

# CALENDARIOS VISUALES PARA ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS CON TEA

Neira, Rodolfo; Neira, Rodolfo (H)

*Facultad Regional San Francisco, Universidad Tecnológica Nacional*
*rodolfoneira8@gmail.com*
*Facultad Regional San Francisco, Universidad Tecnológica Nacional*
*neirarodolfo@yahoo.com.ar*

**RESUMEN**

El objetivo de este trabajo es evidenciar el avance de diseño logrado en el proyecto de investigación cuyo propósito es el análisis y desarrollo de tecnologías aplicadas que ayuden a la autonomía de personas con trastorno del espectro autista (TEA). Estas personas suelen ser excelentes pensadores visuales, comprenden y retienen mejor la información que se les presenta de manera visual. Los calendarios visuales se basan en la presentación secuencial de una serie de tareas, de forma clara y simplificada, usando para ello normalmente pictogramas, que facilitan la representación esquematizada sin información adicional innecesaria. Ayudan a comprender las situaciones y saber qué es lo que se espera de ellas, reduciendo de esa manera la ansiedad que les genera lo nuevo e inesperado. En el marco de este proyecto que lleva a cabo la generación de calendarios visuales para estudiantes universitarios con TEA, compartimos antecedentes, cimientos teóricos y el avance obtenido hasta el momento.

**Palabras Claves:** Calendarios visuales – Estudiantes universitarios – Diseño – TEA.

**ABSTRACT**

The objective of this paper is to demonstrate the design progress achieved in a research project aimed at analyzing and developing applied technologies that support the autonomy of individuals with autism spectrum disorder (ASD). These individuals are typically excellent visual thinkers, better understanding and retaining information presented visually. Visual calendars are based on the sequential presentation of a series of tasks, in a clear and simplified manner, typically using pictograms, which facilitate schematic representation without unnecessary additional information. They help students understand situations and what is expected of them, thereby reducing the anxiety generated by the new and unexpected. Within the framework of this project, which generates visual calendars for university students with ASD, we share the background, theoretical foundations, and the progress achieved to date.

**Keywords:** Visual Calendars – College Students – Design – ADS.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los motivos más importantes que nos inspiraron a trabajar en esta área de investigación, es buscar una solución a una problemática social que es la falta de nuevas tecnologías y herramientas educativas que ayuden a las personas con TEA, en su vida cotidiana, especialmente en el entorno universitario. En este trabajo se presenta la generación de calendarios visuales para el entorno universitario que puedan ser de utilidad para personas de distintas franjas etarias. Estos calendarios ayudarán a las personas que tengan TEA a organizar sus actividades académicas y personales de manera efectiva.

Los TEA son un grupo de trastornos neurológicos y del desarrollo que afectan la forma en que las personas interactúan con los demás, se comunican, aprenden y se comportan. Aunque se puede diagnosticar el TEA a cualquier edad, se le conoce como un "trastorno del desarrollo" porque generalmente los síntomas aparecen durante los primeros dos años de vida.

Según el Manual Diagnóstico y Estadístico de los Trastornos Mentales (DSM-5), una guía creada por la Asociación Americana de Psiquiatría que utilizan los proveedores de atención médica para diagnosticar trastornos mentales, las personas con TEA a menudo tienen dificultad para comunicarse e interactuar con otras personas, intereses limitados y comportamientos repetitivos, y síntomas que afectan su capacidad para desempeñarse en la escuela, el trabajo y otras áreas de la vida. Se utiliza el término “espectro” para describir el autismo porque existe una amplia variación en el tipo y la gravedad de los síntomas que tienen las personas con esos trastornos.

El TEA es la definición más actual y abarcadora que refleja la diversidad de experiencias y habilidades de las personas con este espectro. Esta condición incluye las antes conocidas como: Autismo, Síndrome de Asperger, Trastorno desintegrativo infantil y otros trastornos generalizados del desarrollo.

El termino TEA es usado para evitar la estigmatización que puede surgir al etiquetar a todas las personas bajo un mismo nombre. Esto conlleva a que en el ámbito educativo se pueda distinguir entre autismo como un concepto limitado y TEA permite a los educadores diseñar estrategias de enseñanza más inclusivas y ajustadas a cada estudiante, respetando su particular forma de aprender y socializar.

La población con TEA ha incrementado en los últimos años. A su vez la Organización Mundial de la Salud (OMS), estableció en el año 2019 y entró en vigor en el año 2022, la Clasificación Internacional de Enfermedades, CIE-11, un texto que clasifica las distintas patologías y trastornos con el fin de proporcionar un lenguaje común para informar y controlar las enfermedades, así como para comparar y compartir datos siguiendo unos criterios estándar entre hospitales, regiones y países en distintos períodos de tiempo. (OMS, 2019)

La CIE-11 actualiza los criterios de diagnóstico del autismo, en la misma línea que establece el DSM-5 (Manual diagnóstico y estadístico de trastornos mentales, publicado en 2013 por la Asociación Americana de Psiquiatría). En este sentido, recoge el término único de “Trastorno del Espectro del Autismo” y engloba en esta categoría al Autismo, el Síndrome de Asperger, el Trastorno Desintegrativo Infantil y otros trastornos generalizados del desarrollo, no especificados.

Respecto a las características nucleares del TEA, la CIE-11 también incluye las mismas dos categorías que el DSM-5 (dificultades para la interacción y la comunicación social, por un lado, e intereses restringidos y comportamientos repetitivos, por otro), eliminando una tercera que aparecía en la anterior versión, relacionada con problemas del lenguaje.

En el marco de la Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad, las Nacionales Unidas (ONU, 2024), establece que:

“Los avances tecnológicos tienen el poder de reforzar de forma significativa la inclusividad y el empoderamiento de las personas con discapacidad proporcionando acceso a servicios esenciales, mejorando la comunicación y la movilidad e impulsando una mayor participación en la sociedad. Las tecnologías de apoyo, como los lectores de pantalla para personas con deficiencia visual y los teclados adaptados para personas con deficiencias de movilidad ayudan a las personas con discapacidad a realizar tareas que, de otro modo, podrían ser difíciles o imposibles. La proliferación de formas accesibles de tecnología de la información y las comunicaciones (TIC), como las herramientas y las plataformas de tecnología educativa, los sitios web y las aplicaciones móviles accesibles, las aplicaciones de comunicación para personas con deficiencias auditivas o del habla, las iniciativas de telemedicina y relativas a las ciudades inteligentes, ha revolucionado la forma en que las personas con discapacidad acceden a la información y se comunican con otras personas”.

La llegada a las universidades de personas con TEA, abre un interrogante de cómo abordar esta situación en un contexto de aprendizaje. En universidades extranjeras, también se plantea este escenario y, se lo aborda a través de programas internos que apoyan a estas personas. Alonso et al. (2009) mencionan apoyos en el ámbito universitario: “El Programa APÚNTATE de Apoyos Universitarios a las Personas con Trastornos del Espectro Autista, iniciado en 2001 en la Universidad Autónoma de Madrid con el patrocinio de la Obra Social de Caja Madrid, se ofrece actualmente en otras cuatro universidades públicas (Universidad de Zaragoza, Universidad de Sevilla, Universidad de Burgos y Universidad de Málaga) y constituye una plataforma interuniversitaria única de colaboración cuyo objetivo es mejorar la calidad de vida de las personas con trastornos del espectro autista mediante la creación de apoyos directos a las personas, la formación y la investigación”.

Las universidades nacionales y el Consejo Interuniversitario Nacional (CIN), atentos a esta situación y, en el marco de integrar a todas las personas, a través de sus órganos colegiados, emitió la siguiente declaración:

“La Red Interuniversitaria de Discapacidad (RID) perteneciente a la Comisión de Extensión, Bienestar Universitario y Vinculación Territorial del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) emitió una declaración, el 16 de diciembre de 2019, donde se avanza en el posicionamiento desde el CIN, acerca del cumplimiento y los alcances de la Convención de los Derechos de las Personas con Discapacidad (CDPD) con jerarquía de constitucional por Ley 27044/2014, en el ámbito universitario, habilitando generar un saldo conceptual y político – con participación activa de las personas con discapacidad- en pos el diseño, planificación e implementación de políticas universitarias accesibles con perspectiva de discapacidad. En virtud de ello tenemos, Las universidades públicas – en tanto miembros integrantes del Estado Argentino – están obligadas a cumplir y hacer cumplir el CDPD. El derecho a la educación superior es un bien social, público y gratuito y un derecho humano que debe ser asegurado operativamente para todas las personas con discapacidad sin exclusiones de ninguna naturaleza y respetando la diversidad, ya que todas las condiciones de discapacidad con sus diferentes manera de comprensión de la vida y el mundo que nos rodea enriquecen la condición humana y fortalecen su dignidad inherente a ella, Por todo lo expresado, la RID del CIN afirma su compromiso ético, legal e institucional para la remoción de las barreras que impidan el ejercicio operativo del derecho a la educación superior, apoyando las acciones de reflexión y revisión de aquellos actos que constituyan obstáculos que afectan a las personas con discapacidad y sus derechos humanos en cada institución universitaria”. (CIN, 2020)

La Universidad Tecnológica Nacional y la Facultad Regional San Francisco, propician la apertura para el ingreso de estudiantes, respetando la diversidad y sin exclusión de ninguna naturaleza. Teniendo en cuenta que pueden acceder personas con TEA, se incorporan los calendarios visuales para poder apoyar una variedad de funciones comunicativas en diversos ambientes. Los calendarios apoyan la transición desde formas concretas a formas abstractas. Por ejemplo, para determinar el horario de una cátedra, se sustituye el nombre textual por una imagen representativa (pictograma). Cuando se introduce en una rutina del calendario, la simplicidad y un medio altamente estructurado resalta el cambio. Los calendarios asocian los símbolos o formas (por ejemplo, señas objeto, gráficos) a actividades que la persona está haciendo realmente. Esto asegura que los símbolos tienen una base de experiencia detrás de ellos y que realmente se comprendan. El símbolo o forma con que representamos las actividades en el calendario ayudara a traer la actividad a la mente. El estudiante tiene la libertad entonces para hablar sobre las cosas antes o después que ellas ocurran.

El objetivo de este trabajo es evidenciar el avance de diseño logrado en el proyecto de investigación cuyo propósito es el análisis y desarrollo de tecnologías aplicadas que ayuden a la autonomía de personas con trastorno del espectro autista (TEA), que participen en entornos de educación superior.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Estrategia metodológica.

#### 2.1.1 Tipo de abordaje.

El enfoque metodológico será cualitativo.

#### 2.1.2 Definición del universo.

El universo del estudio incluirá a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química en la UTN Facultad Regional San Francisco. Esto permitirá analizar tanto a los estudiantes de primeros años como los estudiantes avanzados.

### 2.1.3 Selección de la fuente de datos.

Para la obtención de la información, se recurrió a la base de datos existente en la Secretaría de Asuntos Estudiantiles de dicha Facultad Regional.

Además, se realizaron entrevistas personalizadas con profesionales de la salud que participan en el acompañamiento de las personas con TEA.

### 2.1.4 Etapas de implementación.

Para desarrollar el presente proyecto de investigación, se definió realizarlo en las siguientes etapas:

a. Recolección de datos y entrevistas para obtener información objeto de esta investigación
b. Revisión de trabajos de investigaciones previas sobre el tema
c. Desarrollo del diseño preliminar
d. Estudio y selección de herramientas tecnológica para su implementación
e. Desarrollo del aplicativo
f. Validaciones y correcciones finales.

## 2.2. Investigación previa y recursos existentes.

El TEA se caracteriza por el deterioro de la capacidad de comunicación e interacción social, dificultades motrices, comportamientos repetitivos y déficit cognitivo. Generalmente son sujetos pasivos, alejados de las personas y poco sensibles a su entorno, evitan cualquier contacto visual, muestran resistencia a los cambios de ambiente y a actividades inusuales. Las personas con TEA con frecuencia tienen problemas con la comunicación y la interacción sociales, y conductas o intereses restrictivos o repetitivos. Las personas con TEA también podrían tener maneras distintas de aprender, moverse o prestar atención. Es importante señalar que algunas personas sin TEA también podrían presentar algunos de estos síntomas. Estas características pueden dificultar mucho la vida de las personas con TEA. (Hyman et al., 2020)

Existen numerosos estudios que evidencian que el sentido visual es el mejor preservado en los que padecen TEA y que incluso existen conceptos que habitualmente no evocan imágenes visuales, activan áreas visuales supuestamente destinadas al procesamiento visual de la corteza parietal y occipital en estas personas. En consonancia con estos hallazgos, diferentes trabajos apuntan a que la mayoría de las personas con TEA son pensadores visuales en vez de verbales, según Herrera (2012), es decir, comprenden, asimilan y retienen mejor la información que se les presenta de manera visual, frente a la información verbal, las imágenes permanecen en el tiempo e implican un menor nivel de abstracción. (Gómez Leyva, 2011)

En los últimos años, se extendió el uso de agendas pictográficas en los contextos de aprendizaje de los jóvenes con TEA. Se trata de procedimientos que implican el registro gráfico o escrito de secuencias diarias de actividades y, frecuentemente, el resumen simple de sucesos relevantes en el día. Este hecho facilita la anticipación y compresión de las situaciones, según se muestra en la Figura 1:




*Figura 1 Agenda visual. ARASAAC.org (Palau, sf)*

Un pictograma es un elemento gráfico que se utiliza para representar conceptos, objetos o acciones mediante imágenes simples y fácilmente reconocibles. Estas representaciones visuales son herramientas poderosas que ayudan a comunicar de manera efectiva, superando las barreras lingüísticas y facilitando la comprensión. Además, en el contexto específico del TEA, los pictogramas desempeñan un papel crucial al mejorar la comunicación brindando un medio efectivo y la calidad de vida de las personas con esta patología. Estas representaciones gráficas, que utilizan imágenes simples y fácilmente reconocibles, han demostrado ser una herramienta valiosa para mejorar la comunicación y la calidad de vida de quienes enfrentan este trastorno.

Es por este motivo, que el uso de pictogramas o soportes visuales es altamente recomendable en muchas situaciones en personas con TEA, se ponen en evidencia en la Figura 2:

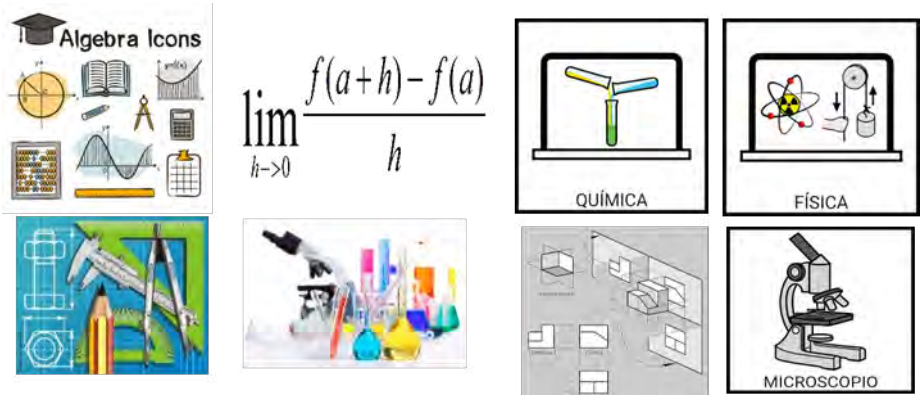



*Figura 2 Pictograma. ARASAAC.org*

Existen tecnologías que permiten facilitar el trabajo con pictogramas y su aplicación en el ámbito educativo, como pueden PICTAR, PictogramAgenda, Azahar, TICO y AraBoard.

A continuación mencionaremos algunas de las situaciones en las que los pictogramas pueden ser de gran ayuda:

1. Comunicación expresiva: Los pictogramas permiten a las personas con autismo expresar sus necesidades, deseos y emociones de manera efectiva, incluso cuando tienen dificultades para comunicarse verbalmente. Pueden utilizar pictogramas para solicitar comida, agua, ir al baño o expresar si se sienten felices, tristes o enojados.

2. Comprensión: Los pictogramas facilitan la comprensión de conceptos abstractos y secuencias de eventos. Pueden ayudar a las personas con autismo a entender instrucciones, horarios, rutinas diarias y procesos complejos.

3. Anticipación, horarios y rutinas: Los pictogramas se utilizan para ayudar a las personas con autismo a anticipar lo que sucederá a continuación. Por ejemplo, pueden ver un pictograma que representa una actividad planificada, como ir al parque, para prepararse mentalmente y reducir la ansiedad asociada con los cambios en la rutina.

4. Marcar normas y límites: Los pictogramas también se emplean para establecer reglas y normas claras. Esto puede incluir pictogramas que representan comportamientos deseables e indeseables, ayudando a las personas con autismo a comprender lo que se espera de ellas en diferentes situaciones.

Por lo tanto, los pictogramas pueden utilizarse en una amplia gama de situaciones para apoyar la comunicación, la comprensión y la anticipación en personas autistas.

Simplemente es analizar la situación concreta y valorar si el uso de pictogramas pueda hacerla más llevadera para la persona con autismo.

Actualmente, existen calendarios de pictogramas y herramientas visuales que ayudan a las personas en el espectro autista a organizar sus rutinas. Ejemplos de estos recursos incluyen:

- PECS,

- Visual Schedule Planner,
- Boardmaker y,
- SchKIDules.

Sin embargo, muchos de estos recursos no están específicamente adaptados al entorno universitario ni disponibles en español.

### 2.3. Objetivo de calendarios visuales.

Crear calendarios visuales específicos para el entorno universitario que pueda ser útil para personas de cualquier edad. Este calendario ayudará a las personas en el espectro autista a organizar sus actividades académicas y personales de manera efectiva.

#### 2.3.1 Beneficios generales.

○ Estructuración del Tiempo: Ayudan a entender y predecir eventos futuros, reduciendo la ansiedad relacionada con cambios e incertidumbre.
○ Desarrollo de Habilidades de Planificación: Facilitan el aprendizaje de habilidades de planificación y organización mediante representaciones visuales.
○ Mejora de la Comunicación: Útiles para personas no verbales o con dificultades en la comunicación, facilitando la expresión y comprensión de rutinas y expectativas.

#### 2.3.2 Edad de uso.

○ Edad Temprana: Introducidos en la infancia temprana para ayudar a establecer rutinas y entender el flujo del día.
○ Edad Escolar: Utilizados para apoyar la transición entre actividades, el cumplimiento de tareas escolares y la organización diaria.
○ Edad Adulta: Algunos adultos con TEA continúan usándolos para gestionar responsabilidades laborales, actividades sociales y compromisos.

#### 2.3.3 Variabilidad en el uso.

○ Adaptación Individual: La utilidad depende de las preferencias y necesidades individuales. Algunos pueden preferir otros métodos de organización según sus habilidades y estilo de vida.

### 2.4 Implementación en Google Calendar.

Se explorará la posibilidad de desarrollar una extensión o add-on para Google Calendar que permita añadir pictogramas a los eventos. Esto incluiría:

● Definir una biblioteca de pictogramas necesarios.
● Escribir el código necesario utilizando Google Apps Script y la API de Google Calendar.
● Probar y ajustar el add-on para asegurar su funcionalidad.

#### 2.4.1 Recursos necesarios.

● Google Apps Script: Apps Script | Google for Developers
● Google Calendar API: Google Calendar | Google for Developers
● Google Workspace Add-ons: Add-ons - Google Workspace

Después de analizar las herramientas disponibles para crear calendarios visuales se optó por utilizar Google Calendar, porque en Argentina está extendido y arraigado; hacer un calendario desde el inicio no es justificable, teniendo en cuenta que, si lo hiciéramos desde cero estaríamos limitados al uso de éste. Además hay aplicaciones que presentan calendarios que funcionan correctamente. Otra ventaja es que de esta manera se podría usar en cualquier dispositivo y plataforma, desde la computadora, una Tablet, un celular Android y Apple.

Se presenta un diseño preliminar de un calendario basado en las cátedras, y sus respectivos horarios, que se dictan en el segundo cuatrimestre del primer año de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad Regional San Francisco de la Universidad Tecnológica Nacional, como se evidencia en la Figura 3:

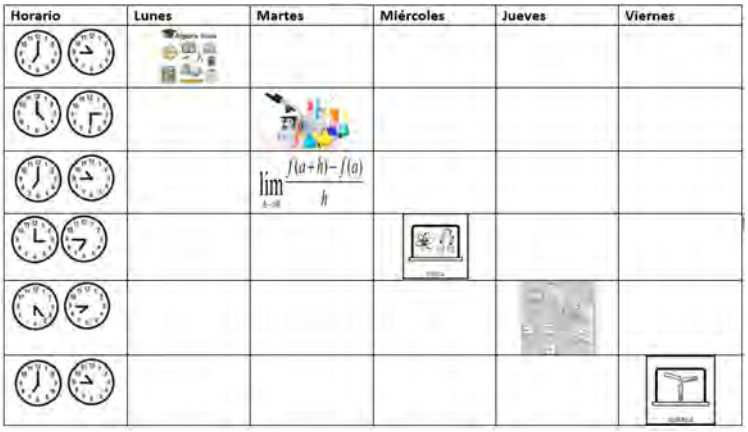



*Figura 3 Diseño preliminar de calendario. Elaboración propia*

### 2.5 Validaciones.

Para corroborar el funcionamiento de este diseño preliminar, se opta por dos etapas de validaciones:

Como primera instancia, se convocará a personas expertas externas al equipo de investigación, buscando el enfoque teórico-técnico y empírico de la validación.

En una segunda instancia, se solicitará la colaboración de personas con TEA que se encuentren en un entorno de educación superior, buscando un enfoque práctico de la validación, que puedan realizar aportes sustanciales al diseño, como observaciones, correcciones, mejoras o su aprobación sin cambios, para lograr una retroalimentación fundamentada, sobre la utilidad del diseño para ayudar a su cotidianeidad educativa.

## 3. CONCLUSIONES.

Teniendo en cuenta el objetivo del trabajo presentado y con la información recopilada, se detecta la necesidad de generar nuevas herramientas específicas que faciliten la inclusión, estadía, progreso y finalización de carreras universitarias de personas con TEA, porque la posibilidad de acceder a ellas es escasa o nula. Continuando con esta línea de investigación se procederá a establecer las técnicas, plataformas y tecnologías a utilizar, para poder desarrollar las herramientas con la mejor relación “simpleza-efectividad”, con los recursos existentes, con fácil accesibilidad para los futuros usuarios, en dispositivos y entornos que resulten familiares, y que su implementación sea con la finalidad de evitar ansiedad en los estudiantes con TEA.

El avance logrado en este proyecto de investigación hasta el presente, abarca la finalización de las siguientes etapas:

- Selección del software de base para su puesta en funcionamiento, en este caso, Google Calendar, por estar presente en la mayoría de los dispositivos inteligentes, Tablet y en computadoras personales.
- Determinación de los elementos componentes del calendario (pictogramas).
- Software de desarrollo utilizado para el diseño y programa del aplicativo.
- Análisis y determinación de la planilla base donde se ubicarán los pictogramas correspondientes.

## 4. REFERENCIAS.

Alonso, N., Belichon, M., Blanco, R., Cáceres, D., Frías, C. (2009). *Hacia un modelo de apoyos universitarios a estudiantes con síndrome de Asperger: Necesidades y propuestas de actuación*. Madrid

Consejo Interuniversitario Nacional (2020). *Resolución CE N° 1503/2020. Programa Integral de Accesibilidad para las Universidades Públicas.* Buenos Aires.

Gómez Leyva I. (2011). El autismo. Atención educativa a niños autistas. En: *Escolares con necesidades educativas especiales, selección de temas*. La Habana: Pueblo y Educación; p. 172-175.

Herrera G. (2012). Pictogram Room: Aplicación de tecnologías de interacción natural para el desarrollo del niño con autismo. *Anuario de Psicología Clínica y de la Salud*. (08):41-46

Hyman, S.L., Levy, S.E., Myers, S.M., y AAP Council on Children with Disabilities, Section on developmental and behavioral pediatrics. (2020). *Identification, evaluation, and management of children with autism spectrum disorder.* 145(1), e20193447.

OMS (2019). Organización Mundial de la Salud. Obtenido de: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/autism-spectrum-disorders

ONU (2024). Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad. Nueva York.

Palao, S. (sf). Aula abierta de ARASAAC. https://arasaac.org

# RELATO DE LA EXPERIENCIA DE APLICAR METODOLOGÍAS ÁGILES EN EL PROCESO DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE

Artigas, Maria Velia; Santille, Luciana Soledad; Glessi, Melisa Andrea; Juan Manuel Caamaño

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar Del Plata*
mvartigas@fi.mdp.edu.ar

**RESUMEN**

Desde el año 2022, se ha comenzado a implementar el uso de Metodologías Ágiles en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la asignatura Administración de Recursos Humanos, perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata. El objetivo de este trabajo es socializar la experiencia pedagógica vinculada a la incorporación de Métodos Ágiles en el ámbito educativo, así como exponer los resultados obtenidos a partir de su aplicación. Esta iniciativa se enmarca en el proceso de rediseño de los planes de estudio de las carreras de ingeniería, el cual promueve el desarrollo de competencias profesionales. En consonancia con dicho enfoque, la asignatura evalúa el proceso formativo mediante un trabajo integrador que articula los conceptos teóricos con una situación real vinculada a una problemática organizacional. Este trabajo incluye el uso de Metodologías Ágiles tanto en su diseño como en la dinámica de trabajo en equipo. Los resultados obtenidos permiten afirmar el impacto positivo de esta estrategia, evidenciado en el compromiso de los estudiantes y el interés manifestado por otros docentes, motivados por el carácter innovador de esta experiencia. La aplicación directa de una praxis específica favorece el desarrollo del trabajo colaborativo, una competencia clave para el ejercicio profesional en el campo de la ingeniería.

**Palabras Claves:** Metodología ágil, trabajo en equipo, estudiantes de ingeniería.

**ABSTRACT**

Since 2022, agile methodologies have been progressively incorporated into the teaching-learning process of the Human Resources Management course, within the College of Engineering at the National University of Mar del Plata. The objective of this paper is to disseminate the pedagogical experience related to the integration of agile methods in the educational setting, and to present the results obtained from their application. This initiative aligns with the ongoing redesign of engineering degree programs, which emphasizes the development of professional competencies. Consistent with this approach, the course evaluates the learning process through an integrative project that connects theoretical concepts with a real-world organizational challenge. This project incorporates agile methodologies both in its design and in the team's work dynamics. The results underscore the positive impact of this strategy, evident in student engagement and the interest shown by other faculty members, who are motivated by the innovative nature of this experience. The direct application of this specific pedagogical practice fosters the development of collaborative work, a key competency for professional practice in engineering.

**Keywords:** Agile methodology, teamwork, engineering students.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hay momentos que marcan un antes y un después en la historia global, transformando la vida de las personas, como la irrupción de internet el año 2000 que significó un punto de inflexión. En ese entonces un motor de búsqueda muy conocido, ligado a un popular servicio de correo electrónico de la época, se convirtió en la puerta de entrada para muchísimos usuarios que comenzaron a navegar por la red. Esa facilidad de acceso impulsó de forma considerable la adopción y el crecimiento de esta nueva tecnología.

En el año 2024, con la aparición de la inteligencia artificial al alcance de toda persona que tenga un dispositivo que la soporte y esté conectado a una red, provoca en las personas otra transformación, la cual no podrá ser medida ni en sus efectos y ni alcances hasta que el tiempo no transcurra. Con estos dos hitos de innovación se pretende sensibilizar sobre el impacto que provoca en la vida de las personas una herramienta determinada.

En la misma línea de pensamiento, los profesionales de ingeniería que se están formando deberán acoplarse a la inmediatez de los cambios, que a su vez atraviesan las organizaciones; por lo cual en su desarrollo profesional deberán poder incrementar respuestas cada vez más adaptativas al dinamismo que impera.

Etzioni (1964) sostiene que la sociedad contemporánea es una sociedad que promueve y construye, invocando el valor de organizar, es una sociedad organizacional. Desde una perspectiva sociológica, mantiene la preeminencia formal, empírica y cuantitativa de las estructuras y funciones formalizadas en instituciones y empresas, lo dicho también subraya, el valor central que las sociedades y los trabajadores (como individuos y como ciudadanos) otorgan al organizar, planificar, proyectar, conducir actividades privadas y públicas, familiares, laborales y políticas. Organizar implica corregir las acciones de una manera relacional. Es decir, las personas requieren un ordenamiento y el trabajo en sí mismo oficia de motor para su desarrollo.

El escenario digital acelera que los límites se desdibujan, profundizando lo que la globalización inició. El modelo de trabajo cambió. Los esquemas de trabajo actuales son dinámicos, los sujetos deben poder aceptar una figura de autoridad diferente, ubicada en un organigrama que se vuelve más horizontal, respondiendo a estructuras matriciales, lo cual no significa ni garantiza que el poder se distribuya equitativamente entre los miembros de la organización, pero instaura un nuevo orden. Por lo antes mencionado, existen transformaciones que atraviesan el bienestar de los colaboradores (Artigas, 2015).

Esta publicación se propone como objetivo principal socializar reflexiones obtenidas sobre la incorporación de una herramienta de la práctica profesional para el trabajo en equipo como mediación pedagógica en el aula. Utilizando la simulación de una situación de trabajo en organizaciones con la agilidad, con el fin de acercar esta metodología a la futura vida profesional de los estudiantes. Asimismo, en el corto plazo se espera que con este diseño innovador se pueda profundizar y mejorar el desarrollo del trabajo en equipo de los estudiantes de ingeniería.

## 2. ENCUADRE TEÓRICO

En un mundo que evoluciona rápidamente, donde el cambio es la única constante, la capacidad de adaptación se ha convertido en una cualidad indispensable. Es en este escenario que emerge el concepto de "agilidad", una filosofía que se inicia en la gestión de proyectos de software y que logra trascender, para transformarse en una forma de pensar y también de trabajar con otros. Aunque sus raíces más reconocidas se encuentran en el desarrollo de software de finales del siglo XX, a partir de simplificar y dinamizar la estructura rígida de los modelos tradicionales, la agilidad no tardó en demostrar su verdadero valor.

La esencia de la metodología ágil reside en la flexibilidad, la colaboración constante, la entrega de valor incremental y la rápida respuesta a la retroalimentación. Este enfoque, que prioriza a las personas y las interacciones sobre los procesos y las herramientas, y la adaptación al cambio sobre el apego a un plan rígido, rápidamente demostró ser una potente herramienta para equipos en busca de eficiencia y resultados significativos. Hoy, su utilidad se ha expandido mucho más allá de la tecnología, permeando campos tan diversos como el marketing, la salud y, también, la educación, donde facilita entornos de aprendizaje más dinámicos, participativos y centrados en el estudiante. La

agilidad, en definitiva, es una invitación a operar con propósito, eficiencia y una mente abierta al aprendizaje continuo.

Dentro de la metodología ágil se encuentra el modelo *Scrum* que es un enfoque que organiza y da estructura de trabajo a los equipos colaborando a su alto rendimiento. en un método iterativo, incremental y disciplinado que hace énfasis en las personas, los resultados, la colaboración y la responsabilidad y que trasciende las prácticas y las técnicas (Schwaber y Sutherland, 2020, Correa, y Frattesi, 2022).

A continuación se realiza un resumen de algunas definiciones relacionadas a roles, las llamadas "ceremonias" y "artefactos" de *Scrum* (Schwaber, 2004):

- *Product Owner* o propietario: encargado de definir los objetivos del proyecto y marcar sus prioridades. Es el representante del cliente.
- *Scrum Master* o facilitador: encargado de garantizar que la metodología se desarrolle correctamente. Guía las reuniones y ayuda al equipo en los problemas que puedan surgir. No es el líder ya que que el equipo Scrum es auto organizado.
- *Scrum Team* o equipo de desarrollo: equipo auto organizado que desarrolla el producto. Son los responsables de implementar las funcionalidades definidas por el Product Owner.
- *Sprint planning* o planificación: modalidad de reunión organiza el trabajo que se va a desempeñar durante el ciclo (sprint).
- *Daily Scrum* o seguimiento diario del Sprint: es un tipo de reunión que trata de gestionar el avance del proceso diario, al mismo tiempo que coordinar los esfuerzos. Durante esta reunión se ponen de manifiesto las intenciones del equipo de desarrollo, los obstáculos que encuentran, las estrategias y técnicas que emplean, etc.
- *Review/Retrospective* o revisión del sprint, retrospectiva: sirve como análisis y valoración del trabajo desempeñado. Por tanto, un proyecto completo como tal, se debe entender como una secuencia ordenada de ciclos o Sprints, mediante los cuales se irá incrementando el resultado del proyecto de manera iterativa.
- *Product Backlog* o pila del producto: es un desglose de tareas o requisitos proporcionados por el Product Owner que dan cuenta de las necesidades del cliente, de manera ordenada y priorizada. Estas tareas se conocen como "historias de usuario".
- *Sprint Backlog* o pila del Sprint: cada ciclo realiza una entrega de producto o incremento. Para ello se emplea esta lista que contiene las historias de usuario que van a desarrollarse durante la fase de trabajo.

La dinámica de trabajo empieza cuando el *Product Owner* crea el *backlog* y se trabaja en los elementos más importantes o de mayor prioridad primero. Luego, el equipo de trabajo va avanzando a través de los *sprints* hacia el producto final. Durante cada *sprint,* el equipo realiza todo el trabajo, como el diseño, la construcción y las pruebas, necesarias para producir características completas y funcionales que se puedan poner en producción y cuando termina el ciclo el equipo revisa las características completadas con los interesados para obtener retroalimentación. Teniendo en cuenta esa información, el *Product Owner* y el equipo de desarrollo pueden alterar tanto lo que planean trabajar a continuación como la forma en que el equipo planifica hacer el trabajo. Por ello, se dice que los equipos son células independientes y con potestad decisoria en el qué y el cómo se llega una meta deseada. A medida que cada iteración termina, todo el proceso se reinicia con la planificación de la siguiente iteración. El proceso de iteración es continuo y se repite hasta que el producto se haya completado (Rubin, 2013; Vila Grau y Capuz Rizo, 2021).

Se considera que este tipo de metodología colabora con el desarrollo de competencias, puntualmente con la de trabajo en equipo, es por eso que se implementa en el aula. Se entiende por competencia la capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas (estructuras mentales) y valores, que permiten movilizar distintos saberes, en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales (CONFEDI, 2006). Los aprendizajes requieren más que la adquisición de conocimientos y en la actualidad los estudiantes deben poder desarrollar competencias, además de de saberes, habilidades y destrezas, es por ello que se han implementado Metodologías docentes que se centren en el modelo de enseñanza-aprendizaje centrado en el estudiante que permiten evaluar procesos de formación (Gómez, 2020).

En cuanto a los antecedentes, se pueden incluir los estudios realizados por un grupo de investigación de la Universidad de Salamanca (García Holgado et al. 2020), quienes estudiaron el uso de Metodologías Ágiles en las dinámicas de trabajo en equipo como herramientas para fomentar la inclusión y la diversidad, tanto a nivel interno entre el alumnado, como en las soluciones software que propongan. Con una población de 70 estudiantes, respondieron 30 constituyendo la muestra. Sus autores concluyen en que los resultados obtenidos han sido satisfactorios, dado que las acciones definidas en el proyecto han facilitado adaptarse al trabajo a distancia y en particular, cabe destacar la integración del ecosistema tecnológico como parte del desarrollo del trabajo se ha cumplido.

Otro trabajo publicado por Martín Gómez (2020), de la Universidad Ciencias Económicas y Empresariales en San Pablo, Esta propuesta de innovación docente tiene como objetivo dinamizar y acercar al mundo empresarial a los estudiantes, para lograr que se involucren en la solución de problemas de empresas reales que se les plantean en el aula. Con este fin se utilizarán Metodologías ágiles, así para implementarlo se usaron equipos ágiles, utilizando Scrum y Kanban, empleando para este último la aplicación Trello. El enfoque iterativo e incremental de esta metodología dió como resultado que para asignatura en cuestión, hayan desarrollado las soluciones con cinco iteraciones o sprints, añadiendo en cada iteración nuevos resultados de aprendizaje, que permitan conseguir las competencias marcadas en la materia.

Por otro lado, Aragonés-Jericó y Canales-Ronda (2023) de la Universidad de València, en su artículo aportan su experiencia en la integración del proceso de enseñanza-aprendizaje con Metodologías Ágilesen su asignatura: Marketing Financiero en la cual, se aplicaron a escenarios reales empresariales. Para analizar los resultados se ha realizado un análisis cuantitativo exploratorio y descriptivo del feedback proporcionado a las 28 exposiciones realizadas en un evento. Asimismo, se ha realizado una encuesta al estudiantado,con una muestra de 91 estudiantes, y una población de 115 personas. Se obtiene que la educación ágil tiene una influencia muy positiva para los estudiantes tanto para su compromiso, su satisfacción y el desarrollo de habilidades blandas.

En Argentina, una publicación de Rodriguez, Glessi y Teyseyre, (2020) de la Universidad Argentina de la Empresa y la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Tandil, Argentina, realiza una revisión de cómo se ha investigado el uso de juegos serios en Ingeniería de Software para aumentar el compromiso de desarrolladores. Por otro lado, el uso de juegos serios se utiliza para entrenar a futuros profesionales en situaciones cuasi profesionales. Se realizó un relevamiento sistemático de la literatura en el campo de los juegos serios enfocados en la enseñanza de los hoy tan usados Métodos Ágiles, y evaluar diferentes métodos y procedimientos utilizados para evaluar juegos para verificar su efectividad educativa de los mismos. Los resultados son útiles para los investigadores dado que están dispuestos a utilizar juegos serios en el área de enseñanza de Métodos Ágiles.

## 3. METODOLOGÍA

Actualmente en las organizaciones se trabaja en equipo a través de la metodología ágil. En paralelo, en el ámbito educativo se introduce esta metodología para ser utilizada como mediación pedagógica con estudiantes de 4to. año de diferentes terminales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Para evaluar parte del proceso de enseñanza-aprendizaje se utiliza en la asignatura Administración de Recursos Humanos la elaboración de un trabajo grupal donde se articulan conceptos teóricos con una situación real de una problemática organizacional. En línea con ello, los estudiantes en grupos auto-conformados realizan este proyecto, que implica la ejecución de un trabajo en equipo con métodos ágiles.

El monitoreo de la experiencia se lleva a cabo al finalizar el curso cuando los docentes proponen al grupo la realización de una encuesta con un cuestionario autoadministrado en línea para conocer las percepciones de la experiencia como estudiantes en relación a la propuesta de agilidad en el aula. El cuestionario es semiestructurado con preguntas abiertas y cerradas de elección múltiple. Para esta publicación se trabaja con 3 preguntas del cuestionario y se cuenta con tres muestras de estudiantes que corresponden a los años 2023 (N1=22), 2024 (N2=40) y 2025 (N3=30).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. La agilidad como mediación pedagógica

La praxis para algunas profesiones es fundamental como para el caso del profesional en ingeniería. Con lo cual pareciera imposible poder trabajar en su formación sin que ello suponga que la adquisición de conocimientos sea a través de estrategias que suponen el saber hacer. En esta línea se considera importante fijar un posicionamiento sobre a qué se refiere cuando se dice mediación pedagógica. Entonces, se entiende que a la mediación pedagógica como un acto educativo que implica concebir a los sujetos de la enseñanza y del aprendizaje como interlocutores activos en la búsqueda y construcción del sentido. Expresado con sus palabras “En la relación presencial, la mediación puede surgir del trabajo en el aula y depende casi siempre de la capacidad y la pasión del docente (Gutiérrez Pérez y Prieto Castillo, 2020).

Gómez (2020) y Suárez-Guerrero (2003) señalan que el desarrollo de una determinada mediación pedagógica ya sea mediada por TIC, como educación virtual, educación digital, Aprendizaje Basado en Problemas (ABP), Ambientes Virtuales de Aprendizaje (AVA), inteligencia colectiva (); propone por parte de docente un escenario diferente que se configura sujeta a una determinada práctica relacionada con el medio circundante.

En sintonía con ello, los planes de estudio vigentes exigen un incremento en la carga horaria dedicada a la práctica. Esto permite mayor desarrollo de las competencias, es por ello que se decide implementar Metodologías Ágiles para el aprendizaje en trabajo en equipo.

### 4.2. Implementación de Metodologías a la adquisición de la competencia del trabajo en equipo

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, en la cátedra de Administración de Recursos Humanos, se comienza a incorporar a los métodos Ágiles para la formación del trabajo en equipo.

La asignatura se dicta cuatrimestralmente, las clases se estructuran en formato teórico práctico y para la aprobación de la cursada se realizan dos parciales. El primer parcial es individual y el segundo parcial es grupal, ambos teórico-prácticos. Para el segundo parcial se propone el desarrollo de un trabajo donde se articulan los conceptos adquiridos utilizando un artículo periodístico a través del trabajo grupal.

Desde 2022 se introduce la metodología ágil para ser utilizada en la dinámica de trabajo grupal en la elaboración de los trabajos que se evalúan como segundo parcial. En primer lugar se explican los principales puntos de la metodología ágil, el llamado manifiesto ágil, las ceremonias y los roles en este formato de trabajo. Luego, se da la consigna del trabajo a realizar, que está adaptada a la forma de trabajo ágil. A partir del 2025, se incorpora el uso de una plataforma virtual para organizar el trabajo.

Más allá de la consigna del trabajo, que puede tener modificaciones, se mantiene el uso de la metodología ágil para llevarlo a cabo. Utiliza un lenguaje propio de la agilidad, las entregas de trabajo se realizan a través de los llamados *sprint*, cada *sprint* se revisa a través de una *sprint planning* y a modo de cierre del trabajo se realiza una *sprint review* & retrospective*.* Además, para el trabajo grupal se establecen roles Ágiles como: cliente, *scrum master*, *product owner*, grupo de trabajo y *stakeholders*.

Cada cuatrimestre se analiza el desempeño del grupo, tanto de estudiantes como docentes, a través de una encuesta. Esta información se utiliza para la mejora continua de la asignatura, realizando ajustes en la metodología propuesta para satisfacer los requerimientos de los estudiantes.

### 4.3. Resultados de la encuestas de satisfacción de los estudiantes

Durante los años 2023, 2024 y 2025 se han administrado al grupo de estudiantes, que han cursado la asignatura y participado del entrenamiento en agilidad, un cuestionario en línea, autoadministrado y anónimo para conocer cuáles son sus percepciones con respecto a la experiencia de uso de los Métodos Ágiles en la cursada de la asignatura.

A continuación se han seleccionado, aquellas respuestas que son interesantes para el presente artículo expresadas en las figuras 1, 2 y 3. Cabe aclarar que las figuras surgen del comportamiento de muestra global, N= 92, la cual está formada por las siguientes submuestras: del 2023 (N1=22), del 2024 (N2=40) y del 2025 (N3=30).

En la Figura 1: Aplicabilidad de conceptos/herramientas a la profesión. Se intenta indagar cuál es su percepción sobre la posibilidad de articular en su futuro ejercicio profesional, las temáticas estudiadas y las herramientas aprendidas. Se observa que existe un porcentaje significativo del 63% de la muestra que considera que podrán aplicar estos conceptos y técnicas en su desempeño como profesionales de la ingeniería. El 37% señala estar de acuerdo. Cabe destacar que las posibilidades de respuesta eran 5 que iban desde estoy muy de acuerdo a no estoy para nada de acuerdo. Con lo cual, las respuestas son muy positivas.

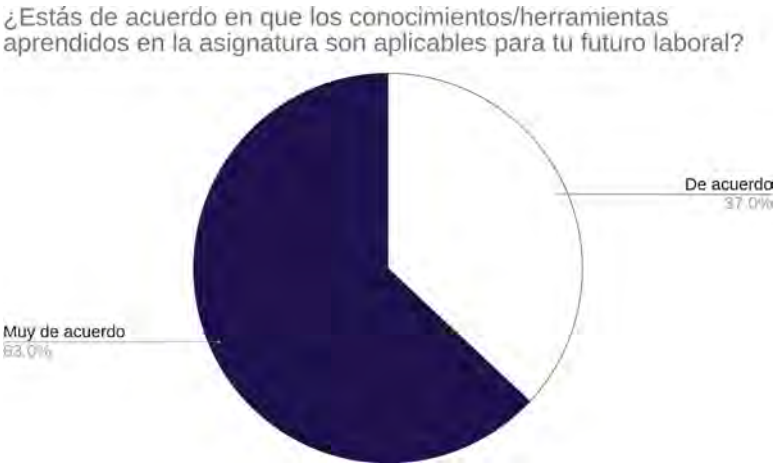



*Figura 1 Aplicabilidad de conceptos/herramientas a la profesión.*

Luego, se los interroga (Figura 2) sobre su percepción de la utilidad de implementar agilidad en el aula. Es decir, se espera que confronten según sus experiencias pasadas, dado que están cursando 4° año de diversas carreras de Ingeniería, si les es más o menos útil trabajar con agilidad. Aquí lo más destacable es que solamente expresa que le resulta indistinto un 1,1% del total. El 43% expone estar de acuerdo en que era útil la incorporación de Métodos Ágiles en el aula, y el 55,4% expone estar muy de acuerdo en cuanto a ello.




*Figura 2 Percepción de la utilidad de implementar agilidad en el aula.*

Finalmente, en la Figura 3, se indaga a los grupos sobre la posibilidad de implementar Métodos Ágiles, en su profesión. Nuevamente la tendencia es positiva, dado que como opciones dentro de una escala tipo Likert de 5 puntos, la muestra ha seleccionado respuestas que van desde Si, lo utilizaría

con el 64,5%, lo propondría como un método de trabajo con un 33,9% y finalmente, solamente si me lo exigen con un 1,6%. Por estos resultados se podría inferir que la experiencia no solamente les ha resultado beneficiosa para su aprendizaje sino que la ven como una buena herramienta profesional.

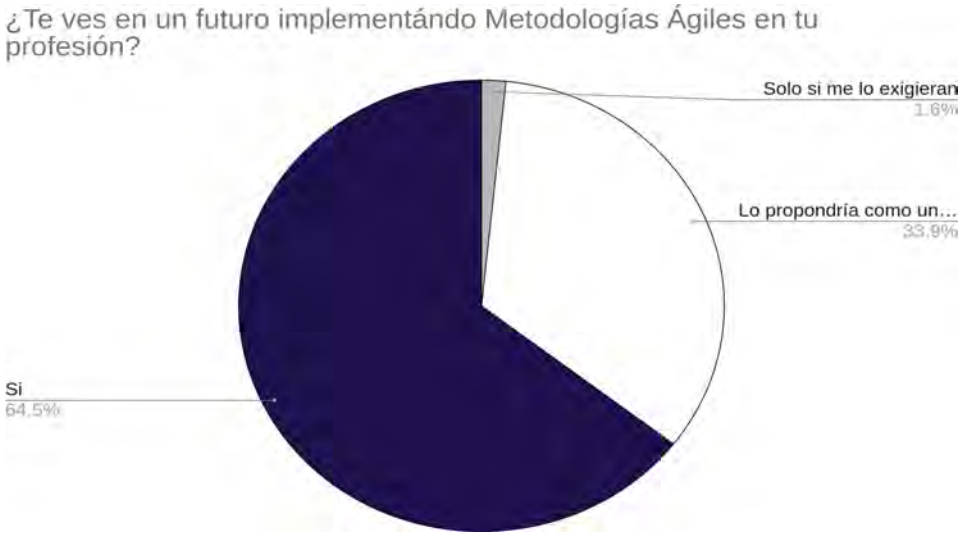



*Figura 3 Intención de aplicabilidad de los Métodos Ágiles en la profesión.*

Si bien hay más datos provenientes de los cuestionarios administrados, se han seleccionado las preguntas y respuestas que están en línea con el objetivo del presente artículo.

## 5. CONCLUSIONES.

En esta publicación, el objetivo propuesto ha sido socializar la experiencia pedagógica vinculada a la incorporación de Métodos Ágiles en el ámbito educativo, así como exponer los resultados obtenidos a partir de su aplicación. Esta inquietud se ha basado en que el equipo de cátedra cuenta con una trayectoría en la aplicación de los Método Ágiles y por ende, se está en una posición ventajosa porque se pueden advertir cuestiones que son propias de la agilidad con otras inherentes a la etapa que los estudiantes atraviesan en sus carreras. Por ejemplo, la notoria motivación por tener contacto con el quehacer profesional y ejercitarse en herramientas profesionales.

Por otra parte, el contexto que se ha vivido durante estos últimos años en todas las Facultades de Ingeniería de todo el país, inmersas en un proceso de rediseño de los planes de estudio de sus carreras de grado, ha promovido a redireccionar prácticas e impulsar mediaciones pedagógicas tendientes al desarrollo de las competencias profesionales que el mercado laboral demanda. Por ello, trabajar con equipos que se valen de la agilidad, no solo lo requiere sino que actúa como un facilitador.

Tal como se puede evidenciar con los datos presentados, se puede sostener la idea que el impacto de incluir agilidad en el aula, no solo es positiva para la concreción del objetivo del aprendizaje de la asignatura sino como estrategia colaborativa, genera interacciones entre los miembros de los equipos provocando un mejor desempeño, sino que han mejorado las comunicaciones y vínculos con el equipo docente, en sus palabras sientes que se los ayuda a aprender, convirtiendo el rol del control por el de facilitador.

Del escenario propuesto, también se podría observar el compromiso por parte de los estudiantes, el interés manifestado por otros docentes de conocer sobre la experiencia, motivados por el carácter innovador de esta experiencia. Como profesionales se considera fundamental favorecer el desarrollo del trabajo en equipo, las acciones y proyectos colaborativos, significando ésta competencia una clave para el ejercicio profesional en el campo de la ingeniería.

## 6. REFERENCIAS.


Aragonés-Jericó, C. y Canales-Ronda (2023). Integración de las presentaciones Pecha Kucha en las Metodologías resentations into agile methodologies, en *Journal of Management and Business Education,* 6(3), 471-487. https://doi.org/10.35564/jmbe.2023.0025

Artigas, M. V. (2015) *Las organizaciones abusivas: cómo el poder y la comunicación producen acoso laboral y violencia psicológica* [Tesis de Doctorado, de la Facultad de Psicología de la UBA] 2015. http://biblioteca.psi.uba.ar//cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=51536

Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI). (2006). Competencias Genéricas de Egreso del Ingeniero Argentino. CONFEDI. https://confedi.org.ar/wp-content/uploads/2021/03/Presentacion-MAPA-CG-ARG-en-CONFEDI-2021.pdf

Correa, E. y Frattesi, L. (1 de junio al 5 de agosto de 2022) *Seminario Programa de Gestión Ágil de Proyectos.* Seminario Aprobado por RES CD-2021-298. Facultad de Ciencias Sociales. UBA.

Etzioni, A. (1964). *Modern Organizations*. Englewood Cliffs. Prentice-Hall, Inc.

Gómez, M. S. (2020). Aplicación de las Metodologías Ágiles al proceso de enseñanza-aprendizaje universitario, en *Revista d'Innovació Docent Universitària,* Núm. 12 (2020), 62-73. http://revistes.ub.edu/index.php/RIDU

Gutiérrez Pérez, F. y Prieto Castillo, D. l. (2020) La mediación pedagógica. Apuntes para una educación a distancia alternativa Buenos Aires: Ciccus - La Crujía, 1999 (6a ed., 1a ed. 1992).

Muñoz Rojas, H. A. (2016), Mediaciones tecnológicas: nuevos escenarios de la práctica pedagógica Praxis & Saber, *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, vol. 7, núm. 13, pp. 199-221

Rodriguéz, G., Glessi, M. y Teyseyre, A. (2020). *Una revisión sistemática de Juegos Serios para la enseñanza de Métodos Ágiles*, en el Simposio Argentino de Educación en Informática, 114-141.

Rubin, Kenneth S. (2013). *Essential Scrum: A practical guide to the most popular agile process*. Ann Arbour. Pearson Education, Inc.

Schwaber, K. y Sutherland, J. (2020). *La guía definitiva de Scrum: Las reglas del juego.* [Archivo PDF].

Schwaber, K. (2004) Agile project management with Scrum. Microsoft Press.

Vila Grau, J. L. y Capuz Rizo, S. (6-9 de julio de 2021) *La extensión de la agilidad al ámbito docente a través de Scram & EduScram.* 25th International Congress on Project Management and Engineering https://www.projecttimes.com



**Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean agradecer a cada uno de los estudiantes que han cursado la asignatura y se han animado a ser parte de esta simulación que pretende generar un entrenamiento para su profesión al utilizar los Métodos Ágiles, con dinamismo y entusiasmo.

# CLASE INVERTIDA Y APRENDIZAJE BASADO EN CASOS EN ASIGNATURA "SIMULACIÓN"

Baquela, Enrique Gabriel; Salguero, María Guadalupe; Cardinali, Juan José;

*Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional.*
*ebaquela@frsn.utn.edu.ar; msalguero@frsn.utn.edu.ar; jucardinali@frsn.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

En este trabajo se presenta una propuesta didáctica basada en aula invertida y aprendizaje basado en casos para una cátedra de simulación de la carrera de Ingeniería Industrial. Se parte del uso de material asincrónico para la presentación de los conceptos teórico fundamentales y para la explicación del uso de las herramientas de software, dejando el tiempo de clase para la resolución de casos "de negocios" mediante la simulación en si. Comenzando con casos simples, se incrementa su complejidad para, al final, permitir que los alumnos desarrollen casi todo el proceso de un estudio de simulación (desde la identificación del problema hasta las alternativas sugeridas para resolverlo). En el trabajo se discuten las ventajas de esta estrategia en términos de motivación, adquisición de competencias y transferencia a contextos profesionales, así como las dificultades encontradas en su implementación.

**Palabras Claves:** docencia; simulación; aula invertida; aprendizaje basado en casos

**ABSTRACT**

This paper presents a teaching approach based on a flipped classroom and case-based learning for a simulation course in the Industrial Engineering program. It begins with the use of asynchronous materials to present the fundamental theoretical concepts and explain the use of software tools, leaving class time for solving business cases through simulation. Starting with simple cases, the complexity increases, eventually allowing students to develop almost the entire process of a simulation study (from problem identification to suggested alternatives for its resolution). The paper discusses the advantages of this strategy in terms of motivation, skill acquisition, and transfer to professional contexts, as well as the difficulties encountered in its implementation.

**Keywords:** teaching; simulation; flipped classroom; case-based learning

## 1. INTRODUCCIÓN

La enseñanza de la temática de Simulación se torna fundamental en la carrera de Ingeniería Industrial. Permite acercar al estudiante a métodos modernos de toma de decisiones en organizaciones, que no descansan tanto en la intuición sino en una comprensión cabal de las posibles consecuencias de las alternativas bajo estudio. A fin de resultar satisfactoria, y dada la disponibilidad actual de simuladores, el foco no debería estar tanto en como funciona un simulador, sino en el proceso en si de identificar las características principales del problema a resolver, cómo modelar el sistema y el problema bajo estudio, cómo simularlo y cómo interpretar los resultados. Para lograr esto, la enseñanza en si debería integrar conceptos teóricos con prácticas auténticas de modelado, verificación, validación y análisis de escenarios.

En ese sentido el Libro Rojo de CONFEDI establece competencias de egreso (p. ej., identificar, formular y resolver problemas de ingeniería, trabajar en equipos, concebir y gestionar proyectos), que los proyectos de simulación permiten evidenciar (CONFEDI, 2018).

En los últimos tiempos, se desarrollaron varios enfoques que tratan de enseñar la praxis de la profesión en el aula. Enfoques como el aula invertida (estudio previo en casa y posterior resolución de problemas en aula), el aprendizaje basado en casos y el aprendizaje basado en proyectos han ganado popularidad, debido principalmente a sus beneficios en cuanto a compromiso y autonomía, aunque con resultados variables en su implementación (Baig & Yadegaridehkordi, 2023; Galindo-Domínguez & Bezanilla, 2025).

En este trabajo se documenta el rediseño y la implementación de las metodologías de aula invertida y aprendizaje basados en casos para una materia electiva de 5to año de Ingeniería Industrial. Se describe la propuesta de casos, se reportan los hallazgos y se discute su alineación con las competencias establecidas a nivel nacional para carreras de ingenierías, como así también las limitaciones para la extrapolación de los resultados del estudio. El trabajo desarrollado se enmarca, cual trabajo de investigación, en el sentido de la investigación-acción (Herreras, 2004; Gomez Esquivel, 2010). Dicha metodología propicia la mejora continua dentro de la clase, implicando una reflexión y análisis de las experiencias didácticas por parte del docente a fin de mejorar la propia actividad.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El aprendizaje invertido, desde hace ya mas de una década, ha recibido gran atención por su capacidad para mejorar la participación estudiantil y el aprendizaje de los educandos (Divjak et. al., 2022). El mismo se ha consolidado como una alternativa capaz de mejorar el compromiso y la calidad del tiempo presencial al desplazar la clase expositiva a la faz asincrónica, reservando la clase para actividades activas. Revisiones y trabajos recientes confirman los beneficios de esta metodología, principalmente en los aspectos de motivación y desarrollo de la autonomía de los estudiantes. Sin embargo, persisten varios desafíos y áreas de preocupación (Baig & Yadegaridehkordi, 2023; Güler et. al. 2023).

Si bien fomenta el autoaprendizaje y la búsqueda de información complementaria, en el aula invertida se pierde la posibilidad de realizar consultas a medida que las mismas van surgiendo durante el estudio, lo cual puede hacer mas difícil la aplicación en las clases de los conocimientos que se deberían haber adquirido en casa. Esto se puede mitigar con canales de consulta y, sobre todo, adoptando un enfoque híbrido, esto es, manteniendo un espacio para consultas dentro de las clases. Pero la principal dificultad radica en que la clase depende fuertemente de la lectura previa o visualización previa de videos, lo cual puede generar dificultades en caso que no todos los estudiantes hayan realizado estas actividades previas (Ng & Lo, 2022).

En ingeniería, estudios subrayan que el aula invertida funciona mejor cuando el tramo presencial incluye actividades de resolución de problemas auténticos, junto con buenas evidencias de desempeño (prototipos y modelos, por ejemplo), de manera que los alumnos puedan valorar su nivel de aprendizaje por si mismos (Al Mamun et. al., 2022; El-Thalji, 2025).

El aprendizaje basado en casos, por otro parte, es una metodología mas antigua que se basa en presentar problemáticas reales, o muy similares a las reales, para que sean analizadas y, en nuestro caso, resueltas por los estudiantes (Greenhalgh, 2007; Rondón García, 2023; Doulougeri et. al., 2024). Si bien presenta la dificultad de preparar los casos, hacer que los mismos sean estimulantes, que sean de resolución abierta, y que presenten cierta dificultad al alumno pero que no sean

irresolubles, la evidencia indica que mejoran no solo cuantitativamente el dictado de clases, sino cualitativamente, al incrementar la motivación de los estudiantes (Estrada Cuzcano & Alfaro Mendives, 2015). En ingeniería, puntualmente, hay evidencia del buen resultado de esta metodología cuando está bien implementada (Peña & Garcés, 2019; Ledezma-Ramírez, 2024).

La literatura sobre educación indica que hay señales de sinergia al combinar la metodología de aprendizaje basado en casos con la del aula invertida (Shi et. al., 2025).

## 3. CONTEXTO Y DISEÑO DIDÁCTICO ASIGNATURA

La asignatura en cuestión, “Técnicas de simulación de sistemas y procesos”, es una materia electiva de 5to año de la carrera de Ingeniería Industrial. Se dicta en modalidad anual y presencial, con una carga horaria de 3 horas semanales. Existe una única comisión para la materia. Entre los temas que abarca se incluyen el modelado y simulación por eventos discretos y por dinámica de sistemas. Se dicta desde 2014 bajo la misma modalidad, fungiendo en la práctica como un taller, debido a que la cantidad de inscritos es pequeña (se mantiene un promedio de alrededor de 10 alumnos). Esto último permite una cercanía mayor en la relación docente-estudiante, así como también facilita la evaluación continua.

El contenido de la asignatura es eminentemente práctico, usando el software Anylogic (Anylogic, 2025) como soporte práctico de la asignatura. La modalidad de trabajo previa a los cambios introducidos (es decir, los descritos en este trabajo) consistía en la exposición de algún concepto de simulación, la búsqueda de un problema de índole práctica asociada al mismo y el planteo de problemas simplificados. La evaluación se realizaba por dos parciales teóricos y la resolución de un trabajo práctico grupal.

Como resultado del dictado bajo esta modalidad se percibía, a nivel docente, que los alumnos no lograban desarrollar la habilidad de afrontar satisfactoriamente problemáticas reales. Esto surgía a la luz durante la realización del trabajo práctico grupal, en el segundo cuatrimestre, ya acontecida mas de la mitad de la cursada. Los alumnos presentaban dificultades para contextualizar el problema presentado, identificar que información necesitarían pare resolver, como proponer alternativas viables, como evaluarlas mediante prueba y error en el simulados y como analizar los resultado. Si bien manejaban el software con soltura, lo hacían a nivel mecánico, no pudiendo avizorar usos alternativos a los presentados en las clases. Desde el punto de vista de los alumnos, los mismos expresaban las dificultades que encontraban y la incomodidad que les resultaba el trabajo práctico. Las notas de esta evaluación eran mas bajas que la de los exámenes escritos.

## 4. CAMBIOS REALIZADOS

Con el fin del aprendizaje de la praxis de la simulación por parte de los estudiantes, se introdujeron una serie de cambios en el dictado de la asignatura. Haciendo uso de grabaciones de video y apuntes, se proveyó a los alumnos del material teórico para su estudio en forma previo a las clases, bajo la modalidad aula invertida. Asimismo, se grabó material relacionado al uso de la herramienta de software y al modelado de problemas simples, para la práctica fuera de clase por parte de los alumnos. Asociado a dicho material, se proveyó una guía de lectura, visualización y práctica, para guiarlos en el consumo esperado del material proporcionado.

La clase presencial comienza con un repaso de los temas enviados para su estudio en casa y la resolución de dudas, si las hubiera. Luego, se pasa a la modalidad principal de la clase. Esta consiste en la resolución grupal (en grupos de 2 o 3 personas) del caso práctico bajo estudio. El caso se envía para su lectura fuera de clase, con gran parte del material necesario para su resolución. Durante la clase, los alumnos trabajan en grupos para intentar resolverlo, lo que implica caracterizar el problema, procesar datos mediante técnicas estadísticas, modelar el problema en el simulador, simularlo y extraer conclusiones. Durante la resolución del caso se les solicita, expresamente, asumir el rol de consultores de la organización en donde el caso transcurre, solicitando información extra si lo creen necesario.

Cada caso tiene una extensión de entre 2 semanas a 6 semanas, de acuerdo a la complejidad del mismo. Los casos avanzan en complejidad, tratando los primeros ejemplos reales, pero sencillos, con foco en la evaluación de escenarios definidos a priori, hasta casos complejos en los cuales los alumnos deben plantear las alternativas de resolución, recabar información extra, generar reportes y

desarrollar una interfaz interactiva para el uso de la simulación por parte de las personas que deberían tomar la decisión.

## 5. EJEMPLO DE SECUENCIA DE CASOS

A modo de mostrar un ejemplo de los casos, se listan a continuación los casos del bloque del tema “Eventos discretos” utilizados durante el ciclo 2025. La secuencia avanza de colas elementales hacia sistemas multirrecurso y, finalmente, una operación logística integral:

- Caso 1 — Estación de servicio. Análisis de tiempos de espera y alternativa de incrementar servidores; modelado de arribos y servicio (distribuciones normales); comparación 3 vs 4 surtidores; entrega de simulación en AnyLogic y reporte. Objetivos: conceptos de colas, validación básica. Evidencias: modelo y reporte con KPIs (espera/promedio/colas).
- Caso 2 — Nueva sucursal bancaria (con restricciones) – parte 1. Determinar el mix de cajas, ATMs y oficinas para minimizar esperas, con restricciones de layout y máximos; ruteos diferenciados por tipos de clientes y perfiles de atención. Objetivos: colas multi-servidor, restricciones operativas, escenarios. Evidencias: modelo “fidedigno” y reporte con análisis.
- Caso 3 — Nueva sucursal bancaria (con restricciones) – parte 2. Continuación del caso anterior, adicionando controles para modificar la simulación en forma dinámica, reportes dentro de la simulación y modelado 3D realista. Objetivos: desarrollo de modelo realista con interactividad por parte del usuario, para poder transmitir mas fácilmente los resultados del análisis. Evidencias: modelo “fidedigno” y reporte con análisis.
- Caso 4 — Flujo de personas en edificio (FRSN). Modelar circulación: ingresos/salidas, recreos y evacuación disparada por botón; analizar cuellos de botella, mapas de calor, capacidad y patrones de congestión. Objetivos: eventos discretos con recursos físicos y seguridad; visualización 3D/2D y métricas
- Caso 5 — Centro de distribución (pseudo gemelo digital). Arribos/descargas/cargas, sideloaders, racks, panel de parametrización y control manual de eventos, reportes automáticos con uso de recursos, tiempos y cuellos; objetivo: evaluar capacidad operativa y dinámica de costos. Objetivos: integración de procesos, múltiples recursos, escenarios y reportes.

En la Tabla 1 se muestra la matriz de alineación de los casos anteriores con los objetivos de aprendizaje y las competencias que se esperan desarrollar:

*Tabla 1 Matríz de alineación*

| Caso | Objetivos de aprendizaje | Competencias (CONFEDI) | Evidencias |
|---|---|---|---|
| Estación de servicio | Colas M/M/s simplificadas; verif/val | Identificar y resolver problemas; trabajo en equipo | Modelo + reporte |
| Sucursal bancaria (1 y 2) | Colas multi-servidor; restricciones; escenarios; transmisión de resultados | Diseño de instalaciones; diseño de operaciones; análisis; trabajo en equipo | Modelo + reporte |
| Flujo de personas | Eventos; seguridad; métricas espaciales | Diseño de instalaciones; aprendizaje autónomo | Modelo interactivo + informe |
| Centro de distribución | Integración; recursos; pseudo-gemelo digital | Diseño de operaciones; aprendizaje autónomo | Modelo parametrizable + reportes |

## 6. RESULTADOS

Debido a la no existencia de comisiones paralelas para la cátedra, no se dispone de un grupo de control para comparar resultados. Por lo tanto, la evaluación de los mismos se realiza comparativamente, apelando a los datos y la información generada en cohortes previas al los cambios detallados en el trabajo, así como también mediante evaluaciones descriptivas de los mismos.

Respecto de los resultados cuantitativos del cambio a la nueva modalidad, se resaltan los siguientes:

- Se aprobaron todas las instancias de entrega, con notas promedio de 9 (en el rango 6 a 10), lo cual es superior al promedio previo de notas de alrededor de 7 puntos.
- Se logró realizar, en los últimos casos, modelos con mayor cantidad de recursos y opciones de interacción que los modelos desarrollados en cohortes previas.
- Los videos, en promedio, mostraron tasas de reproducción por alumnos cercanos a 5, con tasas de visualización de cada video de alrededor del 80% del tiempo total de los mismos, lo que indica cierto estudio distribuido y consulta recurrente del material.
- Se detectó visualización de los videos por todos los alumnos.

Respecto de los resultados cualitativos:

- Se observó un trayecto hacia la autonomía, desde un punto de alta dependencia en el modelado en las primeras clases, hasta la autogestión en los últimos casos.
- Se observó un grado efectivo de trabajo en equipo en la mayoría de los grupos (repartición de tareas y regulación entre pares), aunque no en todos.
- Los alumnos informaron un alto grado de satisfacción con la materia, y perciben que aprendieron mucho acerca de la práctica de la simulación en si, no solo del uso del software.
- Evaluando modelos de simulación realizados en las nuevas cohortes y las anteriores al cambios, profesores externos a la asignatura resaltan una mejora en la calidad y complejidad de los trabajos. La Figura 1 muestra un ejemplo gráfico de la interface creada para el caso 5 por uno de los grupos.

La implementación no está exenta de dificultades. Asegurar el estudio previo del material asincrónico es difícil, sobre todo en las primeras clases. Además, el armado de los grupos se debe realizar atendiendo a un buen mix de habilidades en los alumnos, lo que implica, a veces, reagrupar entre caso y caso (generando, esto último, cierto malestar entre los alumnos).

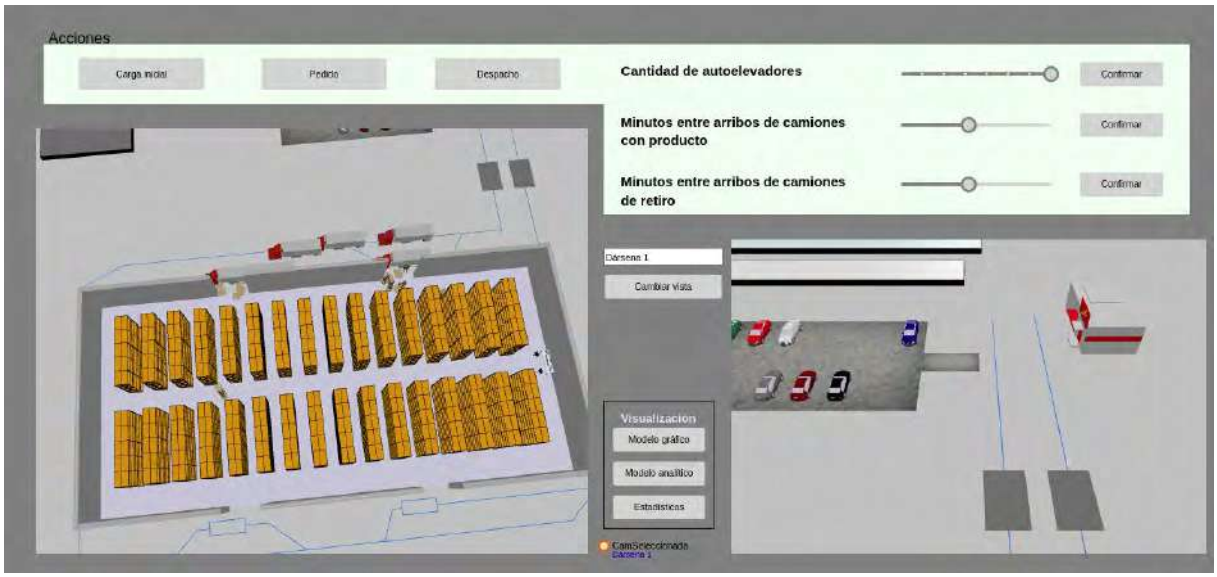



*Figura 1 Ejemplo de modelo creado por alumnos en el caso 5.*

## 7. CONCLUSIONES

La combinación de clase invertida y aprendizaje basado en casos resultó eficaz para las cohortes pequeñas que cursan la asignatura “Técnicas de simulación de sistemas y procesos”, favoreciendo el uso del tiempo de clase en la resolución de problemas cercanos a la realidad. Además, concordando con la literatura, mejora la autonomía y la calidad de los trabajos realizados por los estudiantes. Puntualmente, los casos finales permiten integrar contenidos y evidenciar competencias (resolución de problemas y trabajo en equipo).

El asegurar el estudio previo a las clases es un aspecto complicado. Si bien no se implementó todavía, la literatura recomienda usar quizzes de entrada y microtareas de preparación (Divjak et. al. 2022).

Como un punto débil a resaltar, los resultados de este estudio de obtuvieron bajo del análisis de dos cohortes, sobre las que se implementó el cambio de modalidad) y su comparación con tres cohortes anteriores. Esto, sumado al tamaño de las cohortes, dificultan su generalización a otros contextos.

## 8. REFERENCIAS.


Al Mamun, M.A., Azad, M.A.K., Al Mamun, M.A., Boyle, M. (2022). Review of flipped learning in engineering education: Scientific mapping and research horizon. Education and Information Technology 27, 1261–1286. https://doi.org/10.1007/s10639-021-10630-z

Anylogic (2025). Anylogic Simulation Software (Personal Learning Edition 8.9.4)”.

Baig, M.I., Yadegaridehkordi, E. (2023). Flipped classroom in higher education: a systematic literature review and research challenges. International Journal of Educational Technology in Higher Education 20, 61. https://doi.org/10.1186/s41239-023-00430-5

CONFEDI (Consejo Federar de Decanos de Ingeniería de la República Argentina) (2018). Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la República Argentina. Ed: Giordano Lerena, R., Cirimelo, S. Universidad FASTA Ediciones. https://confedi.org.ar/download/documentos_confedi/LIBRO-ROJO-DE-CONFEDI-Estandares-de-Segunda-Generacion-para-Ingenieria-2018-VFPublicada.pdf

Divjak, B., Rienties, B., Iniesto, F., Vondra, P., & Žižak, M. (2022). Flipped classrooms in higher education during the COVID-19 pandemic: Findings and future research recommendations. International Journal of Educational Technology in Higher Education, 19(1), 1–24

Doulougeri, K., Vermunt, J. D., Bombaerts, G., & Bots, M. (2024). Challenge-based learning implementation in engineering education: A systematic literature review. Journal of Engineering Education, 113(4), 1076-1106. https://doi.org/10.1002/jee.20588

El-Thalji, I. (2025). Boosting Active Learning Through a Gamified Flipped Classroom: A Retrospective Case Study in Higher Engineering Education. Education Sciences, 15(4), 430. https://doi.org/10.3390/educsci15040430

Estrada Cuzcano, A., Alfaro Mendives, KK. L.. (2015). El método de casos como alternativa pedagógica para la enseñanza de la bibliotecología y las ciencias de la información. Investigación bibliotecológica, 29(65), 195-212. Recuperado en 19 de agosto de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-358X2015000100009&lng=es&tlng=es.

Galindo-Domínguez, H., & Bezanilla, M. J. (2025). A Critical Systematic Review of the Impact of the Flipped Classroom Methodology on University Students’ Autonomy. Trends in Higher Education, 4(2), 22. https://doi.org/10.3390/higheredu4020022

Greenhalgh, A. M. (2007), Case method teaching as science and art: A metaphoric approach and curricular application, en Journal of Management Education, 31 (2), pp. 181–194.

Gomez Esquivel, G. (2010). Investigación-Acción: una metodología del docente para el docente. Relinguística aplicada 7. https://relinguistica.azc.uam.mx/no007/no07_art05.htm

Güler, M., Kokoç, M. & Önder Bütüner, S. (2023). Does a flipped classroom model work in mathematics education? A meta-analysis. Educ Inf Technol 28, 57–79. https://doi.org/10.1007/s10639-022-11143-z

Herreras, E. B. (2004). La docencia a través de la investigación-acción. Revista iberoamericana de educación 35 (1), 1-9, https://doi.org/10.35362/rie3512871

Ledezma-Ramírez, D. F. (2024). Aprendizaje basado en casos prácticos integradores en la enseñanza de la ingeniería. Un caso de estudio sobre dinámica estructural. Revista Electrónica Educare, 28(2), 268-284. Epub August 15, 2024.https://dx.doi.org/10.15359/ree.28-2.18442

Ng, L. K., & Lo, C. K. (2022). Flipped classroom and gamification approach: Its impact on performance and academic commitment on sustainable learning in education. Sustainability, 14(9), 5428.

Peña, C., Garcés, G. (2019). Diseño de un módulo basado en casos (cased-based learning) en una asignatura de gestión en ingeniería. XXXII Congreso de la Sociedad Chilena de Educación en Ingeniería (SOCHEDI 2019).

Rondón García, L. M. (2023). Enseñar poniendo el acento en la práctica profesional : aprendizaje basado en casos. En "Laboratorio de casos sociales : el método de casos aplicado al aula desde una perspectiva interdisciplinar - Madrid : Dykinson, 2023- Casalini id: 5586704" - P. 33-60 – URL: https://digital.casalini.it/5586771

Shi, XY., Lu, BR., Yin, Q., Wang, Q.W., Sun, Z. (2025). Whether case-based teaching combined with the flipped classroom is more valuable than traditional lecture-based teaching methods in clinical medical education: a systematic review and meta-analysis. BMC Med Educ 25, 906. https://doi.org/10.1186/s12909-025-07465-4

# USO DE RECURSOS EDUCATIVOS DIGITALES EN LA EVALUACIÓN FORMATIVA PARA PROMOVER EL APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA

Laugero, Lorena; Rodríguez, Georgina; Cardoso Dupuy, Cecilia

*Grupo Ingeniería & Educación*
*Facultad Regional San Nicolás. Universidad Tecnológica Nacional*
*gie@frsn.utn.edu.ar*

**RESUMEN**

La incorporación de Recursos Educativos Digitales se presenta como una estrategia innovadora para enriquecer las prácticas evaluativas, aunque su aplicación en el nivel universitario sigue siendo limitada. Este trabajo muestra una experiencia desarrollada en la asignatura Análisis Numérico y Cálculo Avanzado de la carrera de Ingeniería Industrial en la Facultad Regional San Nicolás de la Universidad Tecnológica Nacional, durante el ciclo lectivo 2025. Para ello, se diseñó un recurso digital mediante H5P que integró actividades interactivas como, por ejemplo, tarjetas conceptuales, ejercicios de asociación, cuestionarios, todas acompañadas de retroalimentación inmediata. Este diseño permitió reforzar contenidos, detectar errores y promover la reflexión sobre el propio aprendizaje.

Para conocer las percepciones de los alumnos sobre la incorporación de estos recursos en la evaluación formativa, se aplicó una encuesta estructurada en dieciséis ítems. Los resultados obtenidos evidencian una valoración positiva por parte de los estudiantes. Se concluye también que los recursos digitales favorecen un aprendizaje activo, promueven la autorregulación y fortalecen la implicación de los estudiantes en su proceso formativo. La evaluación mediada por este tipo de herramientas trasciende la función tradicional de calificación y se consolida como una alternativa que contribuye a aprendizajes más significativos, alineados con las demandas actuales de la formación en ingeniería.

**Palabras Claves:** Estudiantes de Ingeniería, Análisis Numérico, Evaluación formativa, Recursos educativos digitales.

**ABSTRACT**

The incorporation of Digital Educational Resources is presented as an innovative strategy to enrich assessment practices, although their application at the university level remains limited. This paper shows an experience carried out in the Numerical Analysis and Advanced Calculus course of the Industrial Engineering program at the Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional, during the 2025 academic year. For this purpose, a digital resource was designed using H5P, integrating interactive tasks such as concept cards, matching exercises, and quizzes, all accompanied by immediate feedback. This design made it possible to reinforce content, identify errors, and encourage reflection on the students' own learning process.

To explore students' perceptions about the incorporation of these resources in formative assessment, a survey structured into sixteen items was applied. The results showed a positive evaluation from students. It was also concluded that digital resources foster active learning, promote self-regulation, and strengthen students' engagement in their learning process. Assessment mediated by such tools goes beyond the traditional function of grading and it is consolidated as an alternative that contributes to meaningful learning, aligned with the current demands of engineering education.

**Keywords:** Engineering students, Numerical Analysis, Formative assessment, Digital educational resources.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los Recursos Educativos Digitales (RED) se utilizan con frecuencia para facilitar tanto la enseñanza como el aprendizaje de diversos conceptos. Sin embargo, su incorporación en los procesos de evaluación es poco habitual. En este sentido, el uso de este tipo de herramientas en la evaluación permite enriquecer y actualizar las prácticas evaluativas. Estos recursos resultan más atractivos para los estudiantes que los instrumentos tradicionales, ya que los ítems a evaluar pueden presentarse en distintos formatos, generando experiencias más dinámicas e interactivas (Belloch, s.f.; Lafuente Martínez, 2003). Esto no sólo despierta el interés de los alumnos, sino que también propicia un entorno más motivador para afrontar el proceso de evaluación.

Además de mejorar la experiencia, la integración de RED en el proceso de evaluación contribuye a crear condiciones propicias para que los estudiantes logren un aprendizaje más significativo y profundo. Esto es posible al permitir que los alumnos interactúen activamente con los contenidos, reciban retroalimentación inmediata sobre su desempeño y reflexionen sobre su propio proceso de aprendizaje (Morillos García, 2024). De esta manera, las evaluaciones dejan de ser únicamente instrumentos de medición y se convierten en herramientas formativas que favorecen la comprensión, la aplicación y la transferencia de los conceptos aprendidos.

El propósito de este trabajo es compartir la experiencia desarrollada en la asignatura Análisis Numérico y Cálculo Avanzado de la carrera de Ingeniería Industrial de la Facultad Regional San Nicolás de la Universidad Tecnológica Nacional, durante el ciclo lectivo 2025. La propuesta se llevó a cabo durante el aprendizaje de los métodos numéricos que permiten aproximar el valor de una integral definida.

Con el objetivo de enriquecer la evaluación formativa de este tema, se diseñó un recurso digital mediante H5P, que integró distintos tipos de actividades. Este recurso permitió promover un aprendizaje significativo, favoreciendo una comprensión más profunda y duradera que les posibilite aplicar lo aprendido en diferentes contextos.

Para conocer las percepciones de los alumnos respecto a la incorporación de estos recursos en la evaluación formativa, se llevó a cabo una encuesta que brindó información valiosa sobre su experiencia. A partir de los resultados obtenidos, se presenta un breve análisis acompañado de consideraciones finales que invitan a reflexionar sobre el papel de los recursos digitales en las prácticas de evaluación y a explorar nuevas posibilidades para potenciar su integración en la educación superior.

## 2. LA EVALUACIÓN MEDIADA POR RECURSOS DIGITALES

Numerosos estudios han resaltado la importancia del uso de recursos tecnológicos para enriquecer los modos de evaluación (Losada, 2012; Pérez y Herrera, 2019; Rodríguez Wong et al., 2022). Esta preocupación se ha ido profundizando con el avance sostenido de las tecnologías digitales, lo que ha abierto nuevas posibilidades para repensar la evaluación más allá de su función tradicional de calificación y control. En este sentido, se plantea la necesidad de transformar la evaluación en una herramienta formativa, centrada en la mejora continua del aprendizaje, en la participación activa del estudiante y en la construcción de conocimientos de manera más autónoma y reflexiva.

Pantoja Benavides (2020) sostiene que la incorporación de recursos digitales en los procesos evaluativos incrementa el compromiso y la participación de los estudiantes debido al mayor interés y motivación que generan las herramientas tecnológicas en las actividades de evaluación. Además, este tipo de recursos permite a los docentes ofrecer retroalimentación casi inmediata, facilitando que los alumnos identifiquen y corrijan errores en tiempo real, lo que promueve un aprendizaje más efectivo. Estas herramientas no sólo proporcionan información sobre el desempeño de los alumnos, sino que también posibilitan la detección temprana de dificultades, permitiendo tomar decisiones oportunas para superarlas.

Por su parte, Yuste (2021) resalta importantes ventajas del uso de recursos digitales en instancias evaluativas, entre ellas la accesibilidad de realizar pruebas mediante dispositivos electrónicos integrados en la vida cotidiana de los estudiantes. De este modo, el docente puede recopilar de forma rápida información para identificar áreas que requieren refuerzo y ajustar las estrategias de enseñanza.

### 2.1. H5P: una herramienta para el diseño de recursos educativos digitales

Entre las diversas alternativas disponibles para el diseño de RED, H5P se posiciona como una herramienta didáctica de gran valor para la creación de materiales interactivos, con potencial para favorecer el aprendizaje de los estudiantes. Distintas experiencias respaldan esta afirmación al evidenciar los beneficios derivados de la incorporación de contenidos desarrollados con H5P en

entornos educativos, así como la valoración positiva que los alumnos expresan respecto a su uso (Casañ-Núñez et al., 2022; Rossetti-López et al., 2023).

H5P, sigla de HTML5 Package, es una aplicación de código abierto basada en tecnología HTML5 que permite elaborar y compartir actividades interactivas de manera sencilla. Su interfaz intuitiva facilita que los docentes generen contenidos dinámicos sin requerir conocimientos avanzados de programación. Con esta herramienta es posible diseñar una amplia variedad de propuestas, tales como videos interactivos, cuestionarios, crucigramas, tarjetas de diálogo, ejercicios de arrastrar y soltar o completar espacios en blanco, entre otras. Además, los recursos producidos con H5P pueden integrarse sin dificultad en distintas plataformas de gestión del aprendizaje (LMS), lo que favorece su reutilización, adaptación y distribución. Al ser compatible con múltiples dispositivos y navegadores, también amplía el acceso a los materiales y fomenta su empleo en contextos colaborativos.

Existen dos modalidades principales de uso de H5P para generar recursos digitales. La primera consiste en emplear su plataforma en línea, lo cual requiere crear una cuenta en el sitio oficial. De este modo, los materiales pueden diseñarse directamente desde el navegador y compartirse mediante un enlace, aunque permanecen alojados en los servidores de H5P. La segunda opción es integrar los contenidos en un entorno virtual de aprendizaje a través de complementos (plugins) oficiales, disponibles para plataformas como Moodle. En este caso, se necesita que el administrador del sistema instale el complemento correspondiente. Esta modalidad ofrece mayores ventajas, ya que permite un seguimiento detallado de la interacción de los estudiantes con los recursos: integrar los resultados de las actividades al libro de calificaciones, consultar el número de intentos realizados, el tiempo de uso del recurso, entre otros aspectos.

## 3. EXPERIENCIA DE CÁTEDRA

La experiencia se desarrolló durante el ciclo lectivo 2025 en la asignatura Análisis Numérico y Cálculo Avanzado de la carrera Ingeniería Industrial de la Facultad Regional San Nicolás. La misma tuvo lugar durante el proceso de aprendizaje de los métodos numéricos para aproximar integrales definidas numéricamente. El grupo participante estuvo conformado por 42 estudiantes.
Para llevar a cabo la evaluación formativa, se diseñó un recurso digital usando H5P. La elección de esta herramienta se debió a su simplicidad de uso. Además, se trata de un recurso versátil que permite generar diversos tipos de actividades, de acuerdo con las necesidades pedagógicas y los objetivos de aprendizaje. El recurso fue aplicado al finalizar la unidad temática, con el propósito de reforzar los contenidos trabajados en clase y ofrecer retroalimentación inmediata a los estudiantes sobre su desempeño.

### 3.1. Diseño del RED “Integración numérica”

El recurso digital, como se muestra en la Figura 1, inicia con una breve explicación teórica de los métodos de integración numérica estudiados, presentando de manera clara sus principales características y destacando las diferencias que los distinguen. Esta introducción permite a los alumnos contar con una visión general de los métodos antes de avanzar hacia las actividades interactivas de evaluación formativa. Para poder acceder a las explicaciones, basta con expandir el apartado correspondiente.

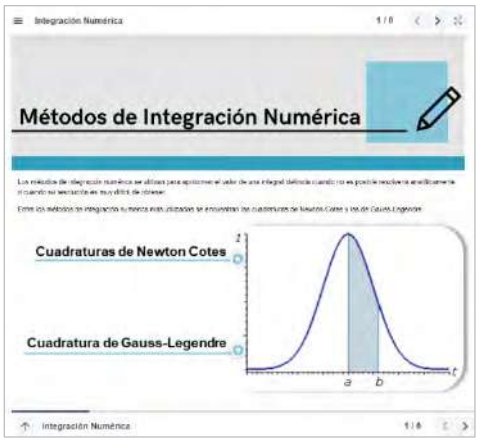



*Figura 1. Explicación teórica de los métodos numéricos*

Con el objetivo de que los estudiantes consoliden las definiciones más importantes relacionadas con el tema, se diseñó la actividad “Tarjetas conceptuales”. En cada tarjeta se presenta un concepto en una de sus caras y, al darla vuelta, aparece su definición, tal como se observa en la Figura 2. Esta dinámica permite a los alumnos trabajar de manera activa con los contenidos.

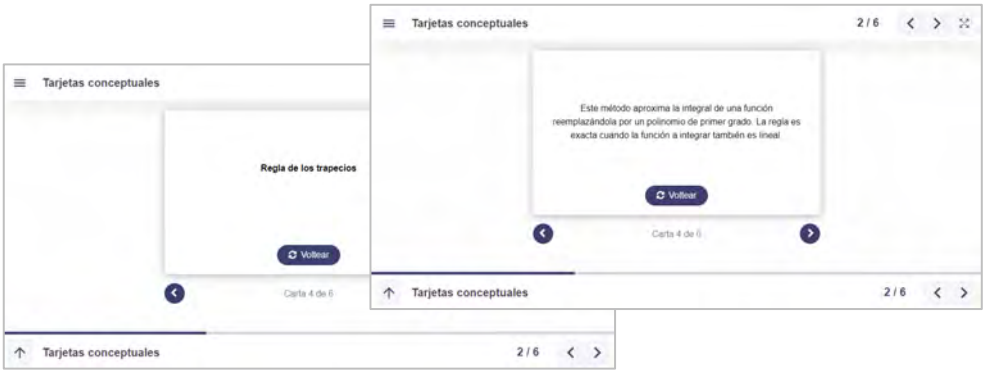



*Figura 2. Actividad “Tarjetas conceptuales”*

En la Figura 3.a se presenta la actividad “Arrastrar la palabra”, diseñada también para reforzar los conceptos importantes de manera interactiva. A diferencia de la actividad anterior, en esta situación el estudiante debe asociar cada término con su definición correspondiente o con alguna característica que lo represente. La inclusión de una palabra distractora obliga al alumno a analizar cuidadosamente cada asociación, favoreciendo así la reflexión sobre los contenidos.

Como se muestra en la Figura 3.b, al finalizar la actividad, el estudiante tiene la posibilidad de verificar si sus respuestas son correctas pulsando el botón Comprobar. Si alguna asociación resulta incorrecta, dispone además de la opción *Mostrar solución* (Figura 3.c), que indica la correspondencia adecuada.

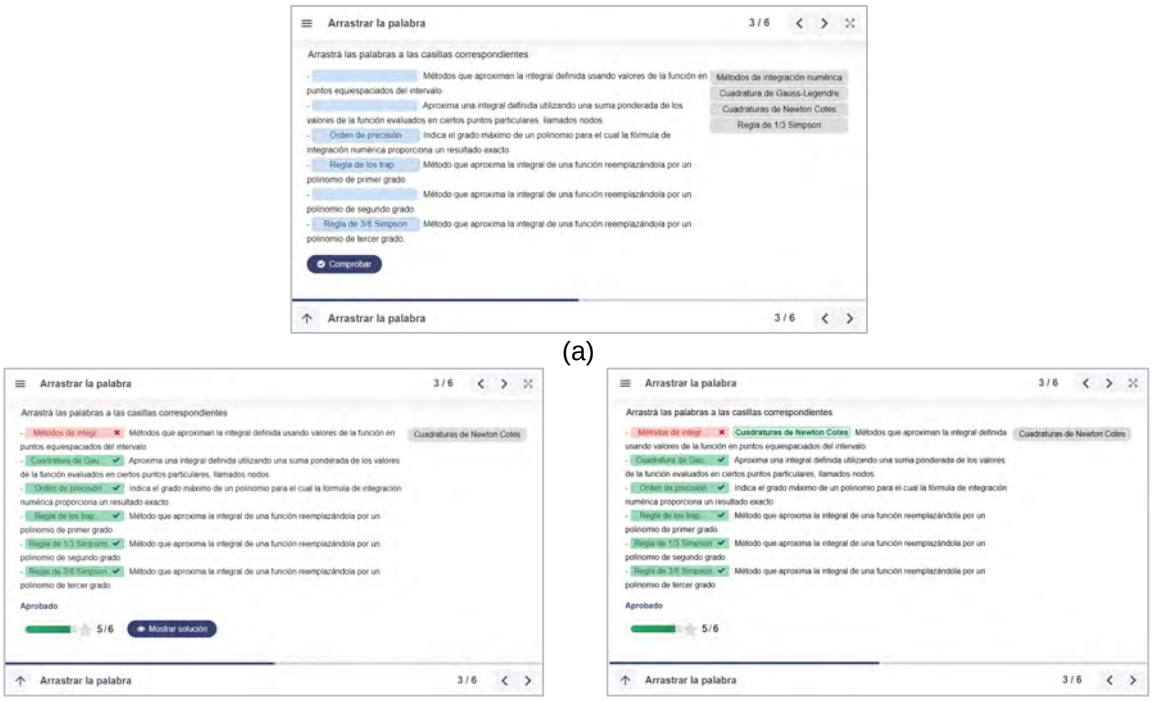



*Figura 3. Actividad “Arrastrar la palabra”*

La siguiente actividad, presentada en la Figura 4, consiste en un cuestionario de seis preguntas de opción única. Su propósito es que el estudiante analice situaciones sencillas y seleccione la alternativa que considere correcta en función de los conceptos trabajados. Al finalizar la resolución de la misma, el recurso permite verificar cada una de las respuestas y muestra la cantidad de aciertos en relación con el total de preguntas propuestas.

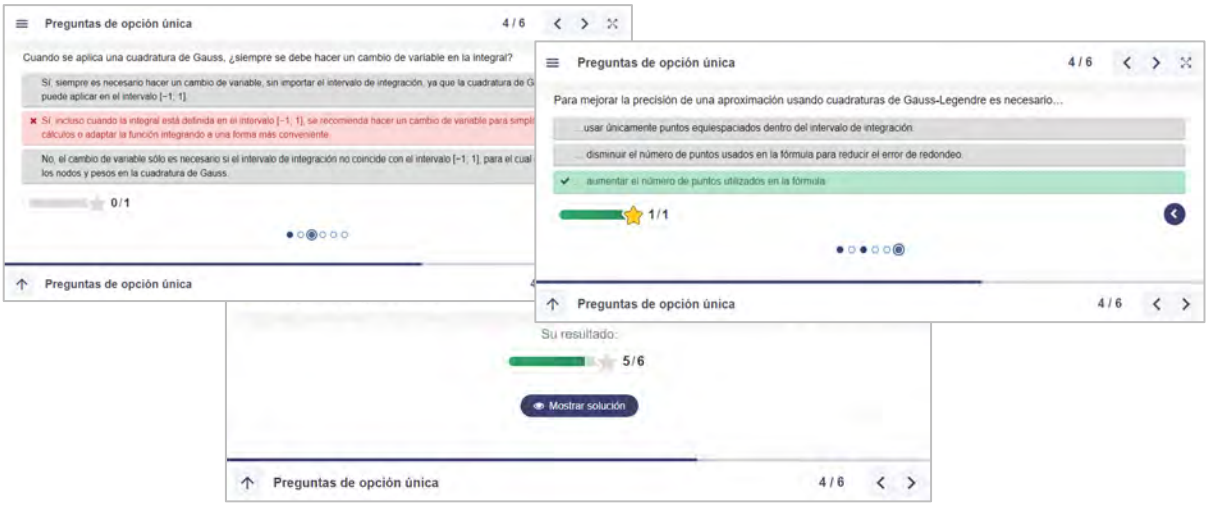



*Figura 4. Actividad "Preguntas de opción única"*

Una vez completadas todas las actividades propuestas en el RED, se presenta un cuestionario final que invita al estudiante a resolver situaciones problemáticas de mayor complejidad, promoviendo un nivel más profundo de comprensión. Este cuestionario incluye consignas en distintos formatos (opción única, verdadero o falso y completar espacios en blanco), lo que enriquece la propuesta y permite abordar los contenidos de diferentes formas.

Las devoluciones que ofrece el recurso en esta instancia posibilitan que el estudiante identifique y corrija errores, consolide los conceptos trabajados y avance en su proceso de aprendizaje. En la Figura 2 se ilustran algunos de los tipos de actividades planteadas.

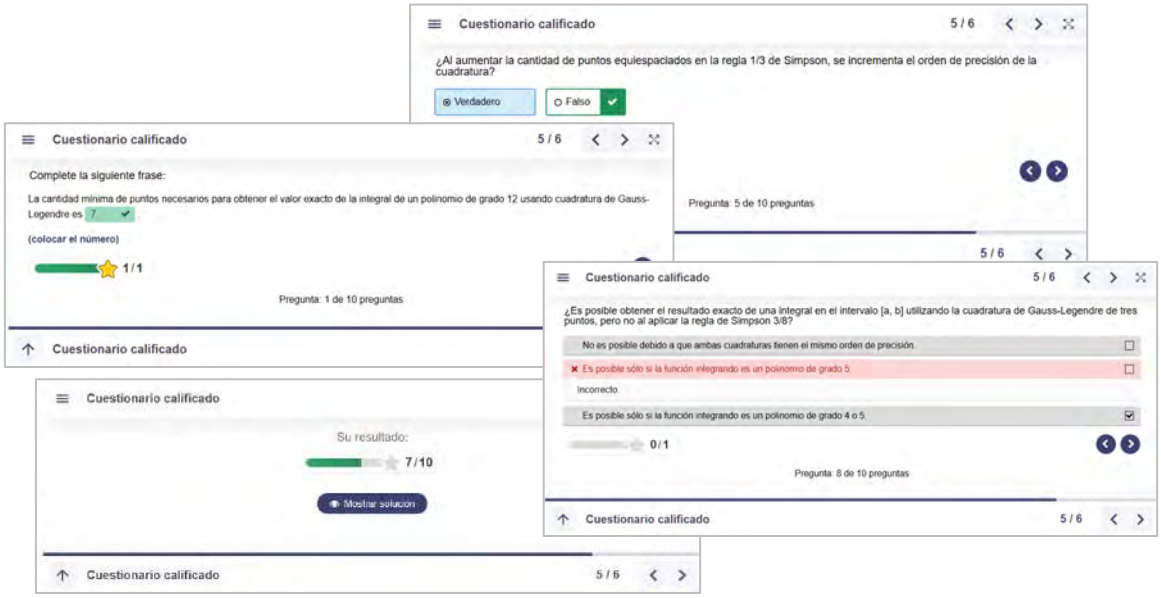



*Figura 5. Actividad "Cuestionario calificado"*

Al finalizar todas las actividades, como se observa en la Figura 6, el recurso genera de manera automática un resumen que ofrece al estudiante una visión integrada de su desempeño. Este informe detalla las respuestas correctas e incorrectas, el puntaje alcanzado en cada actividad y el resultado global obtenido. Además de constituir un registro del progreso del estudiante, este resumen funciona como una herramienta de autoevaluación que permite al alumno identificar fortalezas, reconocer los aspectos que requieren mayor revisión y orientar sus futuros esfuerzos de estudio.

Una cuestión para destacar es que el recurso puede emplearse tanto en el aula como fuera de ella. De este modo, cada estudiante tiene la posibilidad de avanzar de acuerdo con su propio ritmo y necesidades, favoreciendo el desarrollo de la autonomía en el aprendizaje.

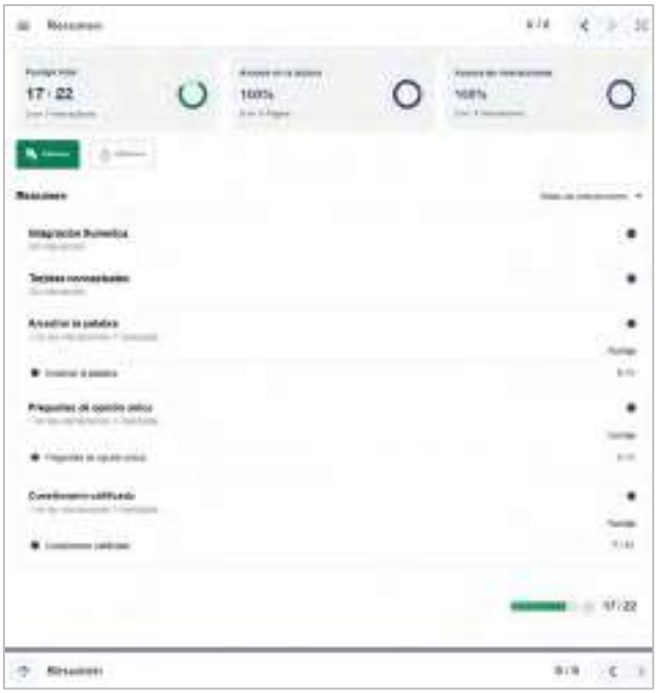


*Figura 6. Resumen generado por H5P*

## 4. PERCEPCIONES DE LOS ESTUDIANTES SOBRE EL USO DE RED

Con el objetivo de conocer las percepciones de los estudiantes sobre el uso de RED en la evaluación formativa, se aplicó una encuesta al curso completo. Este instrumento incluyó preguntas cerradas valoradas mediante una escala tipo Likert, que permitió a los estudiantes expresar su grado de acuerdo o desacuerdo con una serie de afirmaciones relacionadas con su experiencia (Hernández Sampieri et al., 2014). Este tipo de escala facilitó la cuantificación de sus percepciones. La Tabla 1 presenta la escala Likert utilizada y el valor numérico asignado a cada opción de respuesta.

*Tabla 1. Escala tipo Likert y su valor numérico*

| Escala | Valor numérico |
|---|---|
| Totalmente de acuerdo | 5 |
| De acuerdo | 4 |
| Ni de acuerdo ni en desacuerdo | 3 |
| En desacuerdo | 2 |
| Totalmente en desacuerdo | 1 |

### 4.1. Diseño de la encuesta

Para la elaboración de la encuesta, se definieron seis dimensiones para abordar distintos aspectos del proceso de evaluación mediado por recursos digitales. La selección de estas dimensiones se basó en el análisis de una investigación orientada a la evaluación de recursos digitales (Rossetti-López et al., 2023). Las dimensiones establecidas fueron las siguientes:

- Aprendizaje: orientada a indagar en qué medida el uso de recursos digitales favorece la comprensión de los contenidos.
- Motivación: destinada a explorar la influencia que tiene el uso de recursos digitales en el interés y la disposición de los estudiantes.
- Autoevaluación: centrada en analizar las posibilidades que los recursos ofrecen para que los estudiantes valoren sus propios avances y dificultades.
- Retroalimentación: enfocada en identificar la utilidad de la información que reciben los estudiantes a partir del uso de recursos digitales.

- Interactividad: centrada en examinar en qué medida la posibilidad de interactuar con el contenido presentado en los RED favorece la comprensión y el compromiso del estudiante.
- Autonomía: orientada a evaluar si los recursos promueven la autorregulación y la toma de decisiones en el propio proceso de aprendizaje.

En función de las dimensiones seleccionadas, se establecieron indicadores específicos que permitieron operativizar cada una de ellas y orientar la construcción de los ítems del instrumento. De este modo, la encuesta quedó conformada por dieciséis preguntas cerradas. En la Tabla 2, se presentan los indicadores considerados para cada una de las dimensiones.

*Tabla 2. Indicadores de cada dimensión*

| **Dimensión** | **Indicadores** | |
|---|---|---|
| Aprendizaje | 1.1 | Las actividades incluidas en los RED fueron adecuadas para facilitar la comprensión de los conceptos. |
| | 1.2 | El orden en que se presentó el contenido en los RED favoreció la comprensión progresiva del tema. |
| Motivación | 2.1 | El uso de RED despertó mayor interés en mí que otras herramientas tradicionales. |
| | 2.2 | Los RED hicieron que la resolución de las actividades fuera más atractiva y dinámica. |
| Autoevaluación | 3.1 | Los RED me ayudaron a identificar los conceptos que había comprendido correctamente. |
| | 3.2 | Los RED me permitieron reflexionar sobre los errores que cometí al realizar las actividades. |
| | 3.3 | Los RED me ayudaron a tomar conciencia de mis progresos durante el proceso de aprendizaje. |
| Retroalimentación | 4.1 | La retroalimentación recibida a través del RED me ayudó a comprender mejor los conceptos involucrados. |
| | 4.2 | La retroalimentación inmediata me permitió identificar y corregir errores a tiempo, fortaleciendo el aprendizaje. |
| | 4.3 | La retroalimentación ofrecida por los RED fue más útil que la brindada por métodos tradicionales. |
| Interactividad | 5.1 | La interactividad de los RED contribuyó a que comprendiera mejor los métodos numéricos. |
| | 5.2 | La posibilidad de interactuar con el contenido me motivó a comprometerme más con lo que estaba aprendiendo. |
| Autonomía | 6.1 | El acceso a los RED las veces que lo necesitaba me ayudó a reforzar los conceptos a mi propio ritmo. |
| | 6.2 | La flexibilidad que presentan los RED me permitió organizar mejor mis tiempos de estudio. |

### 4.1. Resultados obtenidos

Los datos cuantitativos obtenidos a través de la encuesta fueron analizados mediante técnicas de estadística descriptiva. En una primera instancia, se calcularon las frecuencias absolutas y los porcentajes de cada indicador, lo que permitió reconocer tendencias generales y destacar los aspectos valorados positivamente por la mayoría de los estudiantes.

Con el propósito de facilitar la interpretación de los resultados, se elaboraron gráficos de barras que muestran los indicadores organizados por dimensión, como se muestra en la Figura 7. En dichos gráficos, la puntuación 5 se representa en color verde, la 4 en azul y la 3 en amarillo. Es importante señalar que no se registraron valoraciones con puntuaciones 1 y 2 en ninguna dimensión, motivo por

el cual no fueron incorporadas en las representaciones gráficas, garantizando así una presentación más clara de la información.

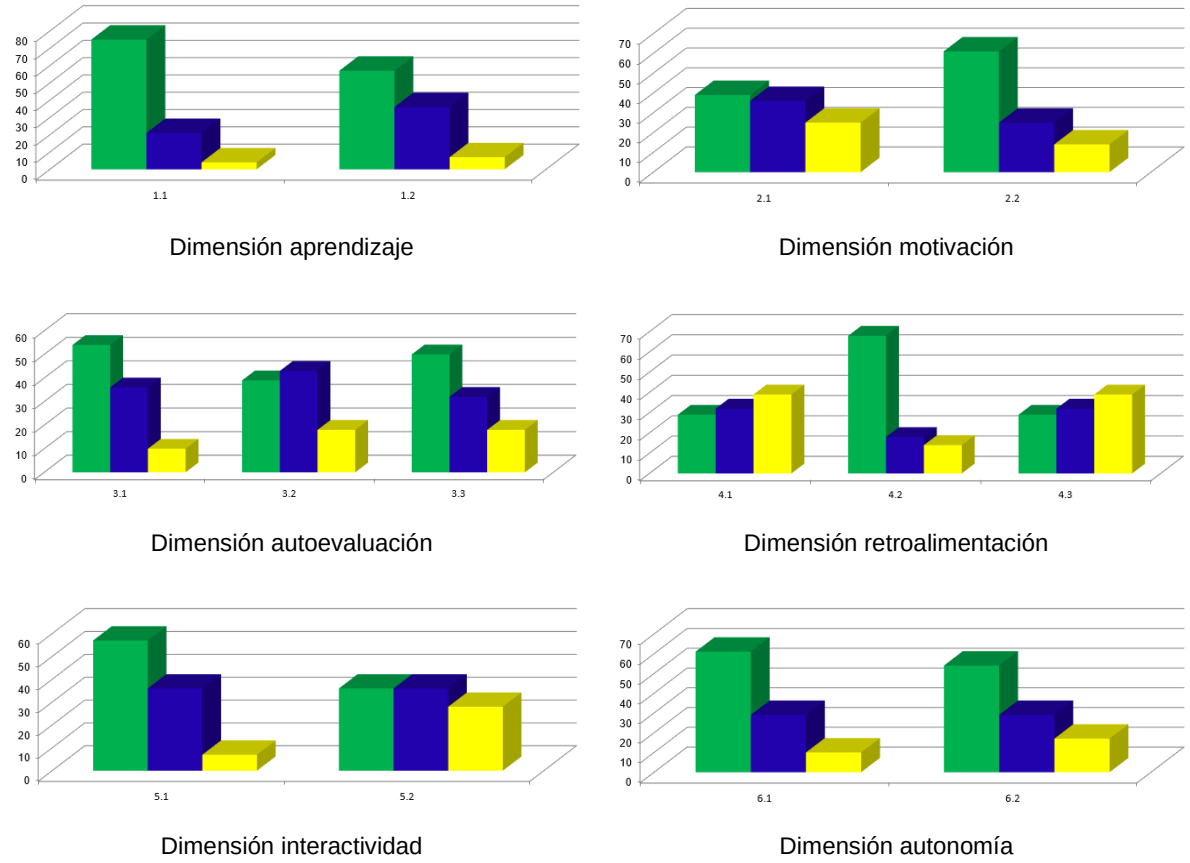



*Figura 7. Resultados de los indicadores de cada dimensión*

Los resultados de la encuesta reflejan una valoración mayoritariamente positiva con relación al uso de los RED durante el proceso de evaluación formativa. En la dimensión **aprendizaje**, el 75% de los estudiantes manifestó estar totalmente de acuerdo en que las actividades incluidas facilitaron la comprensión de los conceptos y, en el caso del orden en que se presentó el contenido, sólo un 7% se ubicó en una posición neutra (ni de acuerdo ni en desacuerdo). Estos resultados evidencian que los RED resultaron pertinentes y de gran utilidad como apoyo al aprendizaje de los conceptos abordados en el tema.

En cuanto a la **motivación**, un 61% manifestó estar totalmente de acuerdo en que los RED hicieron más atractiva y dinámica la resolución de las actividades propuestas. Además, el 75% de los alumnos expresó su acuerdo en que estos recursos despertaron mayor interés que las herramientas tradicionales. Esto indica que los RED tuvieron un efecto positivo en el interés de los estudiantes, favoreciendo un clima de mayor disposición hacia el aprendizaje.

En la dimensión de **autoevaluación**, un 54% de los estudiantes manifestó estar totalmente de acuerdo en que los RED les ayudaron a identificar los conceptos que lograron comprender. Este resultado evidencia que los recursos digitales favorecen la toma de conciencia respecto de los logros alcanzados, constituyéndose en una herramienta útil para monitorear el propio aprendizaje. En relación con la posibilidad de reconocer los progresos realizados y reflexionar sobre los errores cometidos, sólo un 18% expresó una postura neutral (ni de acuerdo ni en desacuerdo).

Respecto de la **retroalimentación**, se observa una fuerte valoración de la inmediatez ya que el 68% estuvo totalmente de acuerdo en que esta les permitió identificar y corregir errores a tiempo. En cambio, en los indicadores relacionados con la retroalimentación para comprender conceptos y la comparación con métodos tradicionales obtuvieron valores más moderados, alrededor del 30%.

En la dimensión de **interactividad**, el 57% de los estudiantes manifestó estar totalmente de acuerdo en que esta característica de los RED favoreció la comprensión de los métodos numéricos, lo que pone

de relieve su aporte al aprendizaje activo. Además, un 72% expresó su acuerdo en que la interactividad incrementó su compromiso con los contenidos, lo que indica que estos recursos no sólo contribuyen a la asimilación conceptual, sino que también fortalecen la implicación de los estudiantes en el proceso de aprendizaje.

Finalmente, en la dimensión de **autonomía**, el 61% de los estudiantes indicó estar totalmente de acuerdo en que el acceso a los RED en cualquier momento les permitió reforzar conceptos y un 54% valoró la flexibilidad para organizar sus tiempos de estudio. Estos resultados muestran que los RED favorecen el aprendizaje autorregulado, al permitir que cada estudiante avance a su propio ritmo y retome los contenidos según sus necesidades.

También se calcularon la media global y el porcentaje de respuestas con valoraciones de 4 y 5 en cada dimensión, lo que permitió una comparación más detallada. En la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos.

*Tabla 3. Media y porcentaje de respuestas con valoraciones 4 y 5 globales en cada dimensión*

| Dimensión | Media global | % Valoraciones 4 – 5 global |
|---|---|---|
| Aprendizaje | 4,61 | 95% |
| Motivación | 4,30 | 80% |
| Autoevaluación | 4,32 | 85% |
| Retroalimentación | 4,11 | 70% |
| Interactividad | 4,29 | 82% |
| Autonomía | 4,43 | 86% |

Todas las medias globales superan el valor de 4 y los porcentajes de valoraciones en los niveles 4 y 5 son elevados, lo que evidencia una tendencia general de aceptación y percepción positiva. La dimensión aprendizaje se destacó como la mejor puntuada. Las dimensiones motivación, autoevaluación, interactividad y autonomía también muestran resultados sólidos. Aunque la dimensión retroalimentación alcanzó una media aceptable y un 70% de valoraciones altas, estos resultados sugieren que sería conveniente potenciarla.

## 5. CONCLUSIONES

La experiencia desarrollada en la asignatura Análisis Numérico y Cálculo Avanzado permitió constatar que la incorporación de RED diseñados con H5P, representa una estrategia innovadora y pertinente para transformar las prácticas de evaluación en el nivel universitario. Los resultados obtenidos muestran que los estudiantes valoraron de manera muy positiva las distintas dimensiones analizadas, especialmente aquellas vinculadas al aprendizaje, la motivación, la autoevaluación y la interactividad. El hecho de que no se hayan registrado valoraciones en los niveles más bajos de la escala refuerza la aceptación generalizada y el reconocimiento de los RED como herramientas valiosas en el proceso formativo.

Por otra parte, la experiencia demostró que los RED contribuyen a promover la autonomía, al ofrecer la posibilidad de acceder a los recursos en distintos momentos y avanzar al propio ritmo. Este aspecto resulta fundamental en la formación de futuros ingenieros, donde la capacidad de autorregulación y el aprendizaje continuo son competencias cada vez más necesarias para desenvolverse en entornos profesionales dinámicos y en constante transformación.

En conclusión, la evaluación mediada por recursos digitales se presenta como una oportunidad para repensar el papel de la evaluación en la educación superior. Más allá de su función tradicional de calificación, se evidencia que puede convertirse en un proceso formativo, dinámico y participativo, orientado a mejorar la calidad de los aprendizajes y a fortalecer la implicación de los estudiantes. El desafío futuro consiste en continuar explorando nuevas formas de integrar estos recursos, adaptándolas a las demandas actuales de la educación superior, de modo que contribuyan a consolidar prácticas evaluativas más inclusivas, flexibles y alineadas con los retos de la formación en ingeniería.

## 6. REFERENCIAS.


Belloch, C. (s.f.). Recursos Tecnológicos para la evaluación psicoeducativa. *Recursos tecnológicos en Educación y Logopedia*. https://www.uv.es/bellochc/logopedia/NRTLogo3.wiki.

Casañ-Núñez, J., Márquez Baldó, L., Millán-Scheiding, C. y Martí Climent, A. (2022). Perspectiva del alumnado de ramas de educación sobre las actividades multimedia e interactivas H5P. En O. Buzón García (Coord.), *Experiencias innovadoras y desarrollo de competencias docentes en educación ante el horizonte 2030* (pp. 1656-1685). Dykinson. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8553652.

Lafuente Martínez, M. (2010). *Evaluación de los aprendizajes mediante herramientas TIC. Transparencia de las prácticas de evaluación y dispositivos de ayuda pedagógica* [Tesis doctoral, Universidad de Barcelona]. https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/42724/1/MLM_TESIS.pdf.

Losada, D. (2012). La tecnología educativa en las universidades públicas españolas. *Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación*, *41*, 133-148. https://recyt.fecyt.es/index.php/pixel/issue/view/3199.

Morillos García, O. (2024). *Uso de las TIC en la evaluación formativa para estudiantes de nivel superior: una revisión sistémica* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Trujillo]. https://dspace.unitru.edu.pe/items/6a4ee0a3-1f12-459a-9416-412f20fa34b7.

Pantoja Benavides, L. (2020). *Implementado las TIC en el proceso de evaluación en la Institución Educativa Nuestro Señor del Río* [Trabajo de grado, Universidad ECCI]. https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/658?show=full.

Pérez, G. y Herrera R. (2019). Indicaciones metodológicas para la evaluación formativa con recursos tecnológicos. UCE. *Revista de posgrado*, *7*(3). http://uceciencia.edu.do/index.php/OJS/article/view/178.

Rodríguez Wong, C., Proaño Cobos, M., Albán Guijarro, M. y Segarra Mendoza, R. (2022). Las TIC como herramientas de evaluación de contenidos curriculares para los institutos superiores técnicos y tecnológicos. *Revista Minerva*, *3*(5). https://revistas.ug.edu.ec/index.php/minerva/article/view/1732.

Rossetti-López, S., Coronado-García, M. y Rojas-Rodríguez, I. (2023). Percepción de los estudiantes sobre el uso de actividades interactivas con h5p. *Revista Iberoamericana de Educación Superior*, *14*(40), 59-76. https://www.ries.universia.unam.mx/index.php/ries/issue/view/48.

Yuste, J. (2021*). Evaluación diagnóstica mediante el uso de herramientas TIC gamificadas, en el Grado Superior de FP en Mecatrónica Industrial* [Tesis de maestría, Universidad de Valladolid]. https://uvadoc.uva.es/handle/10324/50980.

# INTELIGENCIA ARTIFICIAL COMO APOYO TÉCNICO PARA LA ENSEÑANZA DE INFORMACIÓN DOCUMENTADA EN SISTEMAS DE GESTIÓN

Migueles, Marina Alejandra; Ambrústolo, Mariela Beatriz; Berardi, María Betina

*Grupo de Investigación y extensión Gestión Integrada, Personas y Mejora continua. Departamento de Ingeniería Industrial. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Mar del Plata*
*mmigueles@fi.mdp.edu.ar, ambrus@fi.mdp.edu.ar, bberardi@fi.mdp.edu.a*

**RESUMEN**

La elaboración de información documentada en los Sistemas de Gestión de la Calidad y Ambiental suele ser percibida como una tarea poco atractiva por los estudiantes de ingeniería. Para revertir esta percepción y promover un enfoque didáctico innovador, se diseñó un taller en la asignatura Sistemas de Gestión y Mejora Continua, integrando herramientas de Inteligencia Artificial (IA) como apoyo técnico para la enseñanza y elaboración de documentos conforme a ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015. Las conclusiones que se presentan en este trabajo forman parte de un diseño pre-experimental con encuesta de percepción a 50 estudiantes (71 % de quienes cursaron). La actividad se centró en un estudio de caso de una empresa con un Sistema de Gestión Integrado. Las tareas incluyeron generación asistida de documentación mediante IA, análisis crítico según requisitos normativos, elaboración de checklists, reformulación de documentos y reflexión grupal. El 100 % de los estudiantes ya utilizaba IA con fines académicos o creativos. El 68 % percibió un alto o muy alto valor agregado al aprendizaje, el 60 % planea usarla en el futuro para documentación técnica, y el 92 % valoró positivamente la metodología. Las principales ventajas fueron el ahorro de tiempo, la mejora en la redacción técnica y el estímulo al pensamiento crítico. Como desventajas se señalan posibles errores, pérdida de capacidad de análisis y riesgo de dependencia excesiva de la herramienta. Se concluye que la IA, utilizada estratégicamente, constituye un recurso didáctico eficaz para el desarrollo de competencias y habilidades en gestión documental alineada al cumplimiento de requisitos normativos.

**Palabras Claves:** Inteligencia Artificial, enseñanza en ingeniería, información documentada, sistemas de gestión

**ABSTRACT**

The preparation of documented information in Quality and Environmental Management Systems is often perceived as an unappealing task by engineering students. To reverse this perception and promote an innovative teaching approach, a workshop was designed within the course Management Systems and Continuous Improvement, integrating Artificial Intelligence (AI) tools as technical support for teaching and for preparing documents in compliance with ISO 9001:2015 and ISO 14001:2015.The findings presented in this work are part of a pre-experimental design with a perception survey conducted on 50 students (71% of those enrolled). The activity focused on a case study of a company with an Integrated Management System. Tasks included AI-assisted documentation generation, critical analysis according to standard requirements, creation of checklists, document reformulation, and group reflection.All students (100%) were already using AI for academic or creative purposes. Sixty-eight percent perceived high or very high added value to their learning, 60% plan to use it in the future for technical documentation, and 92% positively evaluated the methodology. The main advantages were time savings, improved technical writing, and stimulation of critical thinking. Reported disadvantages included potential errors, reduced analytical capacity, and the risk of excessive dependency on the tool.It is concluded that, when used strategically, AI is an effective educational resource for developing competencies and skills in document management aligned with compliance to standard requirements.

**Keywords:** Artificial Intelligence, engineering education, documented information, management systems

## 1. INTRODUCCIÓN

La información documentada en los Sistemas de Gestión de la Calidad (ISO 9001:2015) y Ambiental (ISO 14001:2015), tiene como finalidad asegurar la comunicación efectiva, evidenciar el logro de resultados, preservar y compartir conocimiento y describir de manera concreta el sistema de gestión de la calidad (ISO, 2021).

De acuerdo con Calso Morales et al. (2018), la documentación facilita el funcionamiento y coherencia operativa. La información escrita posee permanencia y puede ser reproducida en diversos contextos, esto le otorga un rol esencial ya que constituye un soporte para establecer, implementar, mantener y mejorar los sistemas de gestión.

Entre los principales beneficios se destacan que permite demostrar la conformidad con requisitos legales, comprender las interrelaciones de la organización, proporcionar evidencia objetiva de cumplimiento, el apoyo en el abordaje de riesgos y oportunidades, proporcionar conocimiento para el fortalecimiento de las competencias y formación del personal, establecer cómo deben hacerse las cosas y los roles y funciones de las personas. Además, respalda auditorías y evaluaciones del sistema, facilitando la mejora (ISO, 2021).

La información documentada da apoyo a los sistemas de gestión es muy diversa y es seleccionada de acuerdo a las necesidades de las organizaciones (manuales, procedimientos, instructivos, lecciones de un punto, mapeos, planes, declaraciones, especificaciones, registros entre otros). Cada tipo de documento responde a diversas características y requerimientos específicos de creación, actualización y control. Esta diversidad y exigencia normativa hace que la selección de los documentos deba ser rigurosa y apropiada de manera de evitar burocracias y asegurar su eficiencia (ISO. 2021). Esta dificultad se ve reflejada en el aula al momento de realizar las prácticas de documentación de los sistemas de gestión, convirtiéndose en una actividad engorrosa, aburrida y que disminuye el interés y la motivación de los estudiantes.

Es por ello, que el equipo docente de la Asignatura Sistemas de Gestión y Mejora continua ha decido realizar una nueva práctica que permita despertar el interés de los estudiantes a la vez que favorezca el aprendizaje experiencial y colaborativo incorporando la inteligencia artificial (IA) como herramienta didáctica y profesional.

En este contexto, la IA es una herramienta valiosa para agilizar la elaboración de información documentada y facilitar la identificación de normativa aplicable y buenas prácticas. El potencial de simplificar tareas administrativas y ahorrar tiempo ayuda a disminuir la sensación de aburrimiento, aunque este beneficio debe equilibrarse con estrategias pedagógicas que aseguren un aprendizaje profundo y reflexivo (Larico, 2025).

Se ha llegado a un acuerdo generalizado sobre el carácter irreversible del uso de la IA y su capacidad de transformación, gracias a su inclusión en la educación universitaria. Herramientas como ChatGPT han llegado para permanecer, ya que se proyecta que su uso académico seguirá creciendo y brindará la posibilidad de mejorar los procesos de enseñanza aprendizaje y hacerlos más personalizados, eficaces e inclusivos (Larico, 2025). En el ámbito universitario, es un recurso muy valioso debido a su habilidad para producir textos, brindar retroalimentación adaptativa, automatizar tareas repetitivas, ayudar a solucionar problemas complejos y apoyar la gestión de datos e información (Ardisana & Gainza, 2024).

La clave radica en diseñar experiencias educativas que incorporen la IA de forma estratégica. La IA puede encargarse de tareas repetitivas y pesadas, permitiendo a los estudiantes dedicar más tiempo a actividades que realmente estimulan la mente y la creatividad. Esto ayuda a que piensen de manera más crítica, solucionen problemas y aprendan colaborativamente (Castañeda, 2023).

En la misma línea Torres Cruz et al (2023) sugieren que la IA se transforma en un soporte técnico para la evolución de competencias esenciales y no en un reemplazo del esfuerzo intelectual individual.

La IA incide directamente en la formación de competencias técnicas, críticas, normativas, operativas y éticas. En el plano técnico, favorece el dominio de plataformas para la generación y gestión de información. En el plano crítico, obliga a validar la información producida, analizando su calidad y pertinencia, y fomentando la capacidad de discernimiento frente a posibles sesgos o errores. Desde la perspectiva normativa, la reflexión en torno al plagio, la autoría digital y la conformidad con los requisitos normativos refuerza la cultura de responsabilidad académica y profesional (Ardisana & Gainza, 2024). A nivel operativo, el uso de IA optimiza la productividad y la gestión de grandes volúmenes de datos (Larico, 2025), mientras que en la dimensión ética promueve la conciencia sobre el uso responsable,

la privacidad, la equidad en el acceso y el respeto a los límites de la tecnología (Torres Cruz et al, 2023).

El escenario actual muestra que la factibilidad de integrar la IA en la enseñanza universitaria es alta y cuenta con una aceptación creciente entre estudiantes y docentes (Larico, 2025). Los beneficios incluyen mejoras comprobadas en la motivación, el rendimiento académico, la eficiencia y la preparación para un entorno laboral altamente tecnificado (Rodrigo et al, 2024).

No obstante, este potencial abre un debate en torno a los desafíos éticos y pedagógicos que plantean. Entre las principales preocupaciones se destacan el plagio y la deshonestidad académica, la privacidad y seguridad de los datos, la equidad en el acceso a la tecnología y el sesgo algorítmico. Así mismo, es necesario reconocer a la IA como un recurso complementario y no como un reemplazo del pensamiento humano o del rol del docente, promoviendo un equilibrio formativo que combine la innovación tecnológica con el juicio crítico y la creatividad (Ardisana & Gainza, 2024). En consecuencia se vuelve indispensable establecer el uso de la IA en políticas educativas definidas, mediante programas formativos que fomenten un trabajo responsable y ético (Torres Cruz et al, 2023).

En este marco, el presente trabajo explora y evalúa el efecto percibido del uso de la IA como apoyo técnico para la enseñanza de la información documentada en Sistemas de Gestión de la Calidad y Ambiental, tomando como referencia una experiencia práctica en una asignatura de grado de la carrera de ingeniería industrial. El análisis se centra en las posibilidades que ofrece la IA para enriquecer la didáctica universitaria, revertir la percepción negativa de la gestión documental y contribuir al desarrollo de competencias clave en ingeniería industrial, al tiempo que reflexiona sobre sus limitaciones y riesgos. Se parte de la premisa de que la integración de la IA, usada de forma estratégica y crítica, constituye una herramienta pedagógica muy valiosa.

## 2. METODOLOGÍA

El trabajo se desarrolló mediante una estrategia didáctica activa, basada en estudio de caso y sustentada en el aprendizaje experiencial y colaborativo, cuyo objetivo fue integrar teoría y práctica en torno a la documentación de sistemas de gestión, incorporando la IA como herramienta didáctica y profesional. El aprendizaje experiencial se genera en cuatro fases interrelacionadas: el individuo vive una experiencia concreta, reflexiona sobre ella, genera conceptos teóricos y prueba estos en nuevas experiencias. Este proceso cíclico facilita la adquisición de conocimientos, la adaptación y la mejora continua, transformando la experiencia en un aprendizaje significativo (Kolb, 1984).

El estudio de la intervención se desarrolló con diseño pre-experimental con un solo grupo de estudiantes (Campbell & Stanley, 1963), cuyo propósito fue relevar la percepción de los estudiantes tras la utilización de herramientas de Inteligencia Artificial en la elaboración y análisis de información documentada de un Sistema de Gestión Integrado (SGI). Este enfoque fue seleccionado debido a que el interés principal radica en explorar las valoraciones y experiencias derivadas de la intervención realizada.

La experiencia se llevó a cabo en la asignatura Sistemas de Gestión y Mejora Continua, que es cursada por estudiantes de cuarto y quinto año de ingeniería industrial de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Se utilizó como eje un estudio de caso correspondiente a una empresa simulada con un SGI de calidad y ambiental conforme a las normas ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015.

La estrategia didáctica se desplegó en seis etapas secuenciales que incluyen las fases de aprendizaje experiencial:

1. Asignación de tareas a cada grupo de estudiantes: cada grupo de trabajo integrado entre 4 a 6 estudiantes se le asignó un tipo específico de documento del SGI (p. ej., política integrada, objetivos y planes, procedimientos, instructivos, lección de un solo punto o registros).
2. Generación inicial de documentos mediante IA: cada grupo solicitó a una herramienta de IA (ChatGPT u otra equivalente) la redacción del documento asignado, utilizando como insumo la descripción del caso y el marco normativo aplicable.
3. Análisis crítico de los documentos: los textos producidos fueron evaluados por cada grupo en función de los requisitos de las normas ISO 9001 e ISO 14001 en cuanto a creación,

actualización y control de la información documentada, identificando omisiones y deficiencias a requisitos y oportunidades de mejora.

4. Elaboración de lista de verificación colaborativa (checklist): A partir del análisis, los estudiantes diseñaron un checklist colaborativo con criterios para asegurar la pertinencia, trazabilidad y adecuación normativa de la información documentada.
5. Reformulación y mejora de documentos con IA: utilizando nuevamente la herramienta de IA, los grupos reformularon el documento inicial incorporando las mejoras identificadas y alineándolo con los criterios del checklist.
6. Puesta en común de la información documentada, análisis y reflexiones: cada grupo presentó los documentos elaborados y las conclusiones obtenidas.

Al finalizar las actividades, se realizó una encuesta de percepción para relevar la valoración de los estudiantes sobre el uso de IA como apoyo a la generación de información documentada. Las preguntas se enfocaron en el valor percibido de la herramienta, beneficios y desventajas observadas, e intención de uso futuro. Los datos se analizaron presentando frecuencias y porcentajes de respuesta, dada la naturaleza descriptiva y exploratoria del estudio.

## 3. RESULTADOS

Los resultados de la experiencia se relevaron mediante la implementación de un cuestionario de Google forms que fue respondido por 50 estudiantes (71%) que cursaron durante el primer cuatrimestre de 2025 la asignatura anteriormente mencionada.

De acuerdo con los resultados de la encuesta, el 100 % de los estudiantes manifestó utilizar la IA en su vida cotidiana. Los principales usos identificados corresponden a actividades académicas (82 % indicó un nivel de utilización alto o muy alto), seguidos por actividades creativas (38 %), laborales (38 %), informativas (36 %) y recreativas (26 %), también en las categorías de alto o muy alto uso.

Por su parte, el 68 % consideró que la utilización de la IA durante el desarrollo del taller, aportó un alto o muy alto valor al aprendizaje, mientras que únicamente un 8 % indicó haber percibido un aporte bajo o muy bajo, tal como se observa en la Figura 1.

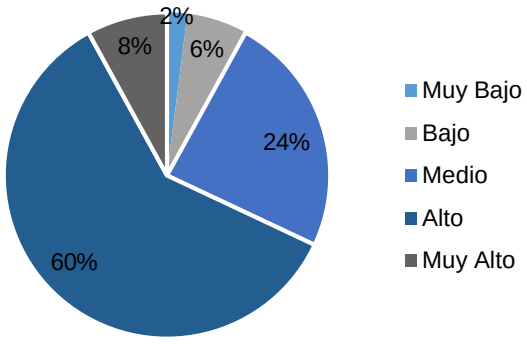



*Figura 1. Grado de valoración de la AI al aprendizaje*

El 92% de los estudiantes encuestados manifestaron que la utilización de la herramienta fue acertada para el tipo de actividad, mientras que el restante 8% hubiera preferido otra estrategia didáctica como por ejemplo usar documentos reales.

La Figura 2 muestra las principales ventajas percibidas por los estudiantes del uso de la IA durante el desarrollo de la actividad. En primer lugar, se destacó la capacidad para ahorrar tiempo en la redacción de documentos; en segundo lugar, permitió mejorar la estructura y claridad de los textos técnicos, y en tercer lugar favoreció el desarrollo del pensamiento crítico al revisar los documentos generados.




*Figura 2. Principales ventajas de uso de IA*

Las ventajas obtenidas en la experiencia realizada se encuentran en línea con el marco teórico y estudios previos donde se resalta la potencialidad de la IA para ahorrar tiempo y simplificar tareas y liberar a los estudiantes de tareas rutinarias y aburridas, permitiéndoles concentrarse en actividades de mayor valor cognitivo. En concordancia con la taxonomía de Bloom se evidencian habilidades de orden superior tales como el análisis y la evaluación (Anderson & Krathwohl, 2001).

En cuanto a las desventajas percibidas por los estudiantes durante la actividad, Figura 3, primeramente se evidenció la posible generación de respuestas incompletas o inexactas, en segundo lugar la pérdida de capacidad de análisis propio si no se reflexiona y en tercer lugar riesgo de dependencia excesiva de la herramienta.

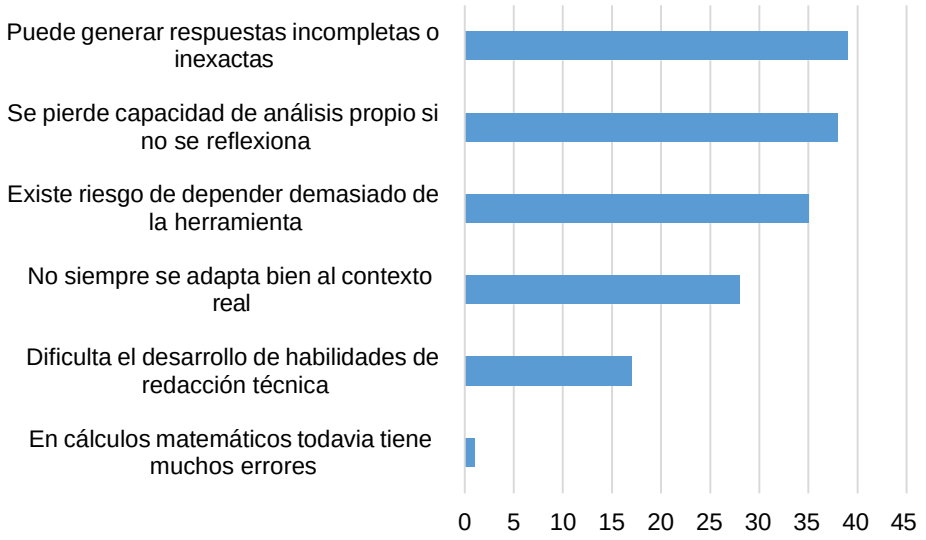



*Figura 3. Principales desventajas de uso de IA*

En este punto el equipo docente diseñó la práctica de manera de poder minimizar los riesgos desde un enfoque de aprendizaje experiencial. Los estudiantes se mostraron cómodos con el uso de la herramienta y alcanzaron un buen nivel de dominio e interacción al finalizar la práctica. Sin embargo, en la primera intervención, las producciones generadas por la IA no lograban cumplir con los requisitos de las normas de gestión ni con las buenas prácticas de elaboración de documentación. Posteriormente, al profundizar en el estudio de los requerimientos de las normas y luego de la construcción de un checklist colaborativo (Figura 4) con los aspectos y requerimientos claves, los

estudiantes pudieron reformular las solicitudes realizadas a la IA de manera más precisa. Este proceso refleja el espiral del aprendizaje activo y experiencial (Kolb, 1984), en la que la experiencia concreta inicial dio lugar a la reflexión crítica, seguida de la conceptualización a través de los instrumentos de verificación y, finalmente, la aplicación mejorada en nuevas interacciones con la herramienta de inteligencia artificial.




*Figura 4. Checklist colaborativo de requerimientos y aspectos claves de la información documentada.*

Además, se observó que documentos elaborados posteriormente en la actividad de integración final de la asignatura fueron diseñados y formulados cumpliendo los requerimientos y recomendaciones trabajados durante la práctica de generación de documentación con apoyo de IA.

Por otra parte se consultó si el uso de IA debería incorporarse como recurso habitual en actividades de formación universitaria, Figura 5, el 64% de los estudiantes manifestó que si, con guía docente y objetivos claros, el 32% tal vez, en actividades específicas y el 4% que debería evitarse su uso en el contexto universitario.

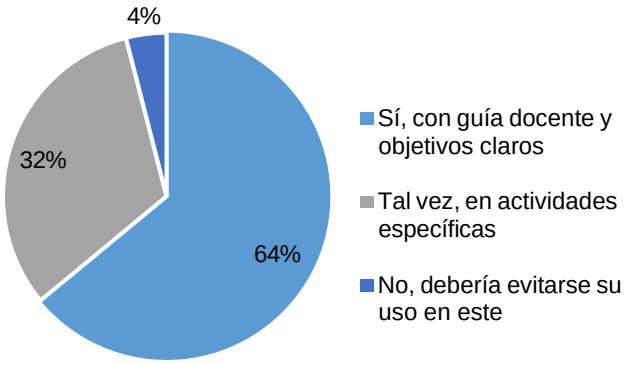



*Figura 5. Utilización de la IA como recurso habitual en la Universidad*

La encuesta indica la conciencia que los estudiantes tienen respecto al uso de la IA en actividades académicas y la necesidad de un equilibrio entre el uso de las herramientas tecnológicas y el pensamiento crítico. Sin perder de vista el rol del docente como facilitador en el proceso de enseñanza.

En relación con el uso de la IA en el ámbito profesional a futuro para la elaboración de documentación técnica, el 60 % de los estudiantes consideró muy alto y alto grado de factibilidad de utilización, mientras que sólo un 6 % consideró bajo grado de la posibilidad de uso, como se muestra en la Figura 6.

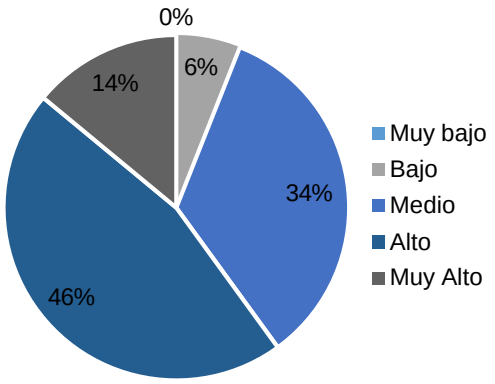



*Figura 6. Grado en que utilizaría la IA para generar o revisar documentación técnica en el futuro*

En la figura 7 se observan los aspectos que más le gustó, a los estudiantes: en primer lugar, señalaron como positivo la incorporación del uso de la IA en una actividad académica como requerimiento, dado que el estudiante reconoce su utilización habitual, en segundo lugar la reflexión sobre el uso de la IA, sus riesgos y sus beneficios y en tercer lugar el uso de un recurso actual en el aula.




*Figura 7. Aspectos que más les gustaron a los estudiantes*

Como resultado general de la experiencia el equipo docente percibió tanto la motivación como la sorpresa de los estudiantes al incorporar el uso de la IA en una práctica del ámbito académico. No obstante durante el cierre y la puesta en común se reflexionó sobre los diferentes riesgos asociados a uso y la necesidad de aplicar análisis crítico de las producciones generadas por la IA.

La actividad logró generar y mejorar colaborativamente un checklist, que se utilizó en el trabajo y que además de mejorar la interacción y solicitudes con la IA permitió establecer un compendio de criterios claves para asegurar la pertinencia, trazabilidad y adecuación normativa de la información documentada. Los criterios relevados responden a aspectos de creación y actualización de la documentación, disponibilidad, protección, control, redacción y contenido de acuerdo al tipo de documento así como de evaluación de necesidad de contar con información documentada.

## 4. DISCUSIÓN

La evidencia recabada muestra que integrar IA en actividades didácticas y en la elaboración y revisión de información documentada mejora la percepción de valor del aprendizaje y la aceptación de la metodología por parte de los estudiantes. Esto es coherente con la guía ISO 10013:2021, que enfatiza directrices para la información documentada de los sistemas de gestión estableciendo criterios de estructura, trazabilidad y control entre otros. El dimensionamiento a través de la IA ayuda a prototipar e iterar con rapidez antes de su validación y de la generación de la versión final del documento.

Además, el diseño de la actividad se alinea con el ciclo de aprendizaje experiencial de Kolb: experiencia concreta (caso), observación reflexiva (análisis crítico), conceptualización (traducción a requisitos normativos) y experimentación activa (reformulación asistida por IA y checklist). Los resultados como alta valoración y disposición a uso futuro para su utilización convergen con reportes recientes sobre beneficios percibidos de la IA en tareas de redacción técnica y revisión guiada (Larico, 2025), siempre que existan criterios explícitos de calidad y un marco de referencia normativa como es el caso desarrollado.

Se destaca también que los propios estudiantes identificaron riesgos como errores, dependencia en el uso sin criterio crítico y posibilidad de disminución de análisis y resaltan la necesidad de equilibrio entre apoyo de IA y guía docente.

La IA ofrece velocidad y variedad de formulaciones, pero la validez y la conformidad requieren de un estrategia y didáctica docente que contemple el desarrollo de indicaciones, verificación contra requisitos específicos de ISO 9001/14001, trazabilidad de fuentes y uso de rúbricas/checklists que controlen criterios como completitud, consistencia y conformidad. Este andamiaje reduce el riesgo de respuestas plausibles pero inexactas y fortalece el pensamiento crítico, al exigir justificación y contraste con documentos normativos y procedimientos internos.

Desde una perspectiva pedagógica, esto se traduce en evaluaciones que incluyen productos intermedios, como borradores y listas de verificación, así como en la metacognición, que implica reflexiones breves sobre las decisiones tomadas con la IA. De esta manera, el uso de la IA se convierte en una competencia profesional y no en un atajo, alineándose con el enfoque de competencia de la norma ISO 9001.

Otro aspecto importante es que la intervención es transferible a otras cátedras de sistemas de gestión e ingeniería con mínimas adaptaciones. Se pueden pensar actividades similares en otras temáticas como Gestión por Procesos al enfocarse en mapear y documentar procedimientos y puede emplearse para preparar listas de verificación, redactar hallazgos y planes de acción en sistemas de gestión entre otros. En Gestión Ambiental se puede utilizar para generar fichas de riesgos y oportunidades, aspectos/impactos y controles operacionales.

Para el desarrollo de cualquiera de estas actividades o las que puedan surgir de su aplicación se requiere un kit de implementación incluye un caso de estudio y datos mínimos sobre la temática a abordar, indicaciones centradas en requisitos, generación de rubricas de validación y roles establecidos.

Para investigaciones futuras se buscará incorporar diseños comparativos a fin de fortalecer la inferencia sobre efectos y consolidar su institucionalización como buena práctica didáctica.

## 3. CONCLUSIONES

La práctica no solo buscó dinamizar el aprendizaje, sino también cultivar habilidades críticas ligadas a competencias normativas, operativas y éticas alineadas con estándares ISO. La intervención que integró la IA en el desarrollo de información documentada para los sistemas de gestión alta aceptabilidad por parte de los estudiantes y alto valor formativo percibido.

Dentro de los aportes esperados se llega a la conclusión de que se cumplió el objetivo del desarrollo de competencias en la generación de documentación técnica, incorporando la IA como un motor de iteración que permita eficientemente lograr los objetivos y promover el pensamiento crítico basado en normativas internacionales.

Dentro de los hallazgos más importantes se destaca que el 92 % valoró positivamente la metodología y que el 60 % manifestó intención de uso futuro para documentación técnica en su futuro desarrollo profesional.

La incorporación de IA como recurso agilizó la redacción de documentos y mejoró su estructura y claridad, pero para la validación del contenido requirió guía docente y checklists para asegurar la conformidad con las normas ISO 9001/14001 e ISO 10013 y evitar dependencia o errores.

Se pudo generar una validación del aprendizaje experiencial (Kolb) observándose “espiral de aprendizaje activo” a partir de producciones iniciales incompletas, reflexión crítica, realización de un checklist colaborativo, la mejora de documentos y la identificación de los criterios para futuras aplicaciones.

Entre las limitaciones de la experiencia figuran el diseño pre-experimental y mediciones realizadas en una sola cohorte.

Desde el punto de vista didáctico, la actividad fomentó la combinación de práctica y teoría en entornos simulados que permiten un aprendizaje profundo, permitiendo a los estudiantes identificar los riesgos y las buenas prácticas para el uso de esta tecnología que debe operar como apoyo.

Integrada con criterio y guía docente, la IA no reemplaza el análisis crítico: lo potencia, acelerando la producción de documentos conformes sin renunciar al juicio profesional que exige un SGI. Por lo que se concluye que la IA, utilizada estratégicamente, constituye un recurso didáctico eficaz para el desarrollo de competencias en gestión documental y que abre infinidades de posibilidades de aplicación.

## 4. REFERENCIAS.


Anderson, L. W., & Krathwohl, D. R. (Eds.). (2001). A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives. Longman.

Ardisana, E. F. H., & Gainza, B. M. (2024). *Inteligencia artificial (ChatGPT) en la educación universitaria: Realidad y consideraciones éticas*.

Calso Morales, N., & Pardo Álvarez, J. M. (2018). *Guía práctica para la integración de sistemas de gestión. ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001*. AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación. Recuperado de https://elibro.net/es/ereader/bibliomdp/53626?page=204

Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1963). *Experimental and quasi-experimental designs for research*. Houghton Mifflin.

Castañeda, A. U. (2023). *Un viaje hacia la inteligencia artificial en la educación. Realidad y Reflexión*.

ISO. (2015a). *ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements*. ISO.International Organization for Standardization.

ISO. (2015b). *ISO 14001:2015 Environmental management systems — Requirements with guidance for use*. ISO.International Organization for Standardization.

International Organization for Standardization. (2021). *ISO 10013:2021 Quality management systems — Guidance for documented information*. ISO.

Kolb, D. A. (1984). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Prentice Hall.

Larico, R. (2025). Impacto de la inteligencia artificial generativa ChatGPT en la enseñanza universitaria. *Revista Chakiñan de Ciencias Sociales y Humanidades, 25*, 317–341.

Rodrigo, T. A. V., Jacqueline, R. A. Y., Viviana, Z. R. S., & Alejandro, S. M. R. (2024). Integración de la inteligencia artificial en la enseñanza universitaria para optimizar el proceso de aprendizaje. *Magazine de las Ciencias: Revista de Investigación e Innovación, 9*(2), 68–94.

Torres Cruz, E., Ibañez Quispe, V., Mendoza Mollocondo, C. I., Yucra Sotomayor, M., Bejar Muñoz, P., Flores Chipana, G. J., Supo Gutierrez, J. A., Puma Huaman, B., & Mamani Luque, O. M. (2023).

Propuesta metodológica en la enseñanza universitaria con la inteligencia artificial. En *Abordagens sobre ensino-aprendizagem e formação de professores* (cap. 10, pp. 127–140). Editorial Científica Digital. Recuperado de https://editoracientifica.com.br

# "DISEÑO DE ESTRATEGIAS FORMATIVAS BASADAS EN SIMULACIÓN PARA FORTALECER HABILIDADES GERENCIALES Y COMPETENCIAS EJECUTIVAS EN FUTUROS INGENIEROS CIVILES INDUSTRIALES"

(*)Miranda Fierro, Jaime; (**) Leal Wilhelm, Naudy, & (***) Orellana, Javiera

*(*)Universidad San Sebastián, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Santiago – Chile.*
*Jaime.miranda@uss.cl*
*(**)Universidad San Sebastián, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Santiago – Chile.*
*Naudy.leal@uss.cl*
*(***)Universidad San Sebastián, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Santiago – Chile.*
*jorellanab2@correo.uss.cl*

**RESUMEN**

La formación de ingenieros industriales exige cada vez más el desarrollo de habilidades gerenciales y competencias ejecutivas que permitan responder a entornos organizacionales complejos, digitalizados y cambiantes (World Economic Forum, 2023; Moldoveanu & Narayandas, 2019). En este contexto, el presente estudio propone el diseño de estrategias formativas basadas en simulación para fortalecer dichas capacidades en estudiantes de Ingeniería Civil Industrial de la Universidad San Sebastián, Chile. La investigación obtuvo datos referentes a focus groups aplicados a egresados de las cohortes 2022 y 2023, cuyo objetivo es identificar brechas formativas en torno a la toma de decisiones, liderazgo, gestión del cambio y visión estratégica (Boyatzis, 2008). Además, se considera una encuesta estructurada aplicada durante el mismo espacio, permitiendo triangular datos y validar tendencias emergentes.

Se recogen también las percepciones de empleadores y tutores de práctica profesional, mediante comentarios incorporados en sus informes de evaluación, para determinar las competencias más valoradas en el entorno laboral. Este diagnóstico se complementa con un análisis de plataformas de empleo (LinkedIn, Laborum, Trabajando.com) y los informes de consejos sectoriales vinculados al área industrial. Los resultados se contrastan con el perfil de egreso institucional, para orientar ajustes curriculares pertinentes.

Como propuesta metodológica, se plantea el uso de simulaciones y entornos inmersivos, los cuales promueven el aprendizaje activo y el desarrollo de competencias complejas mediante experiencias prácticas (Kolb, 2015; Salas et al., 2009). Este enfoque busca alinear la formación universitaria con las demandas actuales del mercado, promoviendo una experiencia educativa adaptativa, significativa y alineada con los desafíos del siglo XXI.

**Palabras Claves:** Habilidades Gerenciales, Competencias ejecutivas, Simulación, Ingeniería Industrial, Estrategias de enseñanza, Mercado del trabajo.

**ABSTRACT**

The training of industrial engineers increasingly requires the development of managerial skills and executive competencies that enable graduates to operate effectively in complex, digitalized, and constantly changing organizational environments (World Economic Forum, 2023; Moldoveanu & Narayandas, 2019). In this context, the present study proposes the design of simulation-based educational strategies to strengthen these capabilities in Industrial Engineering students at Universidad San Sebastián, Chile.

The research gathered data from focus groups conducted with graduates from the 2022 and 2023 cohorts, aiming to identify formative gaps related to decision-making, leadership, change management, and strategic vision (Boyatzis, 2008). In addition, a structured survey was applied during the same sessions, allowing data triangulation and validation of emerging trends.

The study also incorporates the perceptions of employers and professional internship supervisors, based on feedback from evaluation reports, in order to identify the most valued competencies in the workplace. This diagnostic phase is complemented by an analysis of employment platforms (LinkedIn, Laborum, Trabajando.com) and by the review of sectoral council reports related to the industrial field. The findings are contrasted with the institutional graduate profile to guide relevant curricular adjustments.

As a methodological proposal, the future implementation of simulations and immersive environments is suggested, which foster active learning and the development of complex competencies through practical experiences (Kolb, 2015; Salas et al., 2009). This approach seeks to align university training with the current demands of the labor market, promoting an adaptive, meaningful, and future-oriented educational experience aligned with the challenges of the XXI century.

**Keywords:** Managerial Skills, Executive Competencies, Simulation, Industrial Engineering, Teaching Strategies, Labor Market

## 1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de transformación organizacional, globalización e innovación, la formación de ingenieros industriales requiere ir más allá de las competencias técnicas tradicionales, integrando habilidades gerenciales y competencias ejecutivas que les permitan liderar eficazmente en entornos dinámicos. Desde una perspectiva universitaria amplia, que considera a la educación superior como un espacio de articulación entre comunidad académica, egresados y el entorno productivo (Miranda Fierro, 2012), es fundamental alinear los perfiles de egreso con las demandas reales del mundo profesional.

Las habilidades gerenciales se entienden como capacidades operativas específicas asociadas a la ejecución eficiente de tareas como la planificación, la gestión del tiempo, el liderazgo funcional o la toma de decisiones en escenarios acotados. En cambio, las competencias ejecutivas implican una integración más compleja de saberes, incluyendo visión estratégica, inteligencia emocional, adaptabilidad, pensamiento crítico y gestión del cambio (Boyatzis, 2008; Moldoveanu & Narayandas, 2019). Estas competencias son clave para actuar en entornos VUCA (volátiles, inciertos, complejos y ambiguos), propios de la realidad industrial contemporánea.

Este estudio presenta un diagnóstico integral sobre el desarrollo de estas capacidades en estudiantes de Ingeniería Civil Industrial de la Universidad San Sebastián, Chile. Para ello, se triangula información desde distintas fuentes: focus groups con egresados, informes de prácticas profesionales, entrevistas a empleadores, análisis del mercado laboral en plataformas especializadas, revisión de consejos sectoriales y del perfil de egreso institucional. La identificación de brechas permitirá sustentar, en una etapa posterior, el diseño de estrategias pedagógicas que integren tecnologías como la simulación, la realidad aumentada o la inteligencia artificial.

### 1.1 Objetivo de la investigación:

Objetivo General

Diagnosticar las habilidades gerenciales y competencias ejecutivas requeridas por el entorno formativo y profesional de la carrera de Ingeniería Civil Industrial, mediante el análisis de fuentes internas y externas, con el propósito de sustentar futuras estrategias pedagógicas de fortalecimiento basadas en Tecnología.

Objetivos Específicos

1. Identificar las habilidades gerenciales más requeridas por el mercado laboral, los consejos sectoriales, las evaluaciones de práctica profesional y los egresados de la carrera.
2. Analizar el grado de desarrollo actual de dichas habilidades en estudiantes de la carrera, mediante instrumentos de medición aplicados en distintos niveles de formación.
3. Comparar las habilidades observadas en el contexto académico con las competencias declaradas en el perfil de egreso institucional.
4. Determinar brechas formativas entre las habilidades exigidas por el entorno profesional y aquellas efectivamente desarrolladas en el plan de estudios.
5. Fundamentar pedagógicamente una futura intervención, basada en tecnologías de simulación y entornos inmersivos, para fortalecer las habilidades gerenciales y competencias ejecutivas detectadas como prioritarias.

### 1.2 Justificación

El acelerado cambio en las dinámicas organizacionales y tecnológicas ha evidenciado la necesidad de que los ingenieros industriales no solo cuenten con formación técnica sólida, sino también con habilidades gerenciales operativas y competencias ejecutivas estratégicas. Estas capacidades resultan esenciales para liderar equipos, tomar decisiones bajo presión, gestionar el cambio y responder a contextos VUCA. Sin embargo, los actuales procesos formativos en ingeniería presentan limitaciones para evaluar y desarrollar estas habilidades de manera estructurada.

Este proyecto permite diagnosticar de forma rigurosa la situación actual en la carrera, combinando fuentes cuantitativas y cualitativas, internas y externas. Además, contribuye a la mejora continua del perfil de egreso y prepara las bases para una innovación curricular sustentada en evidencia, que podrá integrar tecnologías activas como simulación, realidad aumentada e inteligencia artificial en una fase posterior. Su aporte académico, metodológico y estratégico resulta altamente pertinente para las necesidades del sector formativo e industrial contemporáneo.

### 1.3 Alcance del Proyecto

- Cobertura temporal: Diagnóstico desarrollado durante el año académico 2025.
- Población estudiada: Estudiantes de 1°, 3° y 5° año de Ingeniería Civil Industrial (3 cohortes activas), egresados de las generaciones 2022, 2023 y 2024, y empleadores asociados a las prácticas profesionales.
- Instrumentos aplicados: Encuestas estructuradas, focus groups, revisión de informes, análisis de mercado laboral, revisión documental.
- Delimitación temática: Se abordarán habilidades gerenciales (operativas) y competencias ejecutivas (estratégicas), diferenciándolas claramente en el análisis.
- Limitación: Este estudio no incluye la fase de implementación de estrategias formativas, la cual será abordada en una segunda etapa del proyecto.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Metodología de Trabajo

El presente estudio adopta un enfoque mixto de carácter exploratorio y descriptivo, orientado a identificar brechas en el desarrollo de habilidades gerenciales y competencias ejecutivas en estudiantes de Ingeniería Civil Industrial. La metodología se estructura en cinco fases sucesivas, como se indica a continuación:




**Fase 1: Diagnóstico conceptual de habilidades gerenciales.**

La primera etapa del estudio consiste en un diagnóstico sistemático y multifuente de las habilidades gerenciales demandadas en el contexto formativo y profesional de la carrera de Ingeniería Civil Industrial, con el objetivo de identificar aquellas competencias clave que deben ser desarrolladas o fortalecidas en los estudiantes.

Esta fase contempla el análisis de seis fuentes complementarias, que permiten triangulación y validación cruzada de las habilidades identificadas:

- Detección de habilidades gerenciales del mercado laboral: Se realiza un mapeo de habilidades explícitas solicitadas en ofertas de empleo vigentes, utilizando motores de búsqueda especializados (LinkedIn, Laborum, Trabajando.com, entre otros). Se codifican las habilidades mencionadas en perfiles de cargos afines al rol del ingeniero industrial, diferenciando entre habilidades técnicas, blandas y de liderazgo.
- Detección de habilidades mencionadas en consejos sectoriales: Se revisan las actas y documentos oficiales de los consejos sectoriales asociados al área de ingeniería y gestión.

Estas instancias, integradas por representantes de la industria, la academia y los sectores productivos, permiten identificar tendencias y necesidades emergentes en el desarrollo de capital humano avanzado.

- Detección de habilidades desde informes de práctica industrial y profesional: Se analizan los informes de supervisión y evaluación de prácticas profesionales de estudiantes de la carrera, con foco en los comentarios de empleadores y tutores. Se identifican tanto fortalezas observadas como carencias frecuentes en habilidades gerenciales clave.
- Habilidades requeridas y empleadas por egresados: Se aplica un focus group a egresados recientes (cohortes 2022, 2023 y 2024), en el que se discute la aplicabilidad de las habilidades gerenciales desarrolladas durante la formación, así como aquellas que fueron requeridas en su inserción laboral. Se registra información cualitativa y se aplica un cuestionario estructurado de validación.
- Habilidades declaradas en el perfil de egreso institucional:Se lleva a cabo una revisión documental de las mallas curriculares vigentes, perfiles de egreso y asignaturas del plan de estudios, con el objetivo de extraer las habilidades gerenciales declaradas formalmente por la carrera en términos de resultados de aprendizaje.




Fuente: Elaboración propia

**Fase 2: Medición a estudiantes de pregrado.**

Se aplica una encuesta estructurada a estudiantes de primer, tercer y quinto año de Ingeniería Civil Industrial, basada en el instrumento adaptado de García-Lombardía et al. (2001), que evalúa habilidades como liderazgo, toma de decisiones, comunicación, gestión del tiempo y pensamiento crítico. Se recopilan también percepciones cualitativas mediante preguntas abiertas.

**Fase 3: Identificación de brechas.**

Los resultados de las encuestas se comparan con la información recabada en tres fuentes adicionales:

- Focus group con egresados, que aporta evidencia sobre la aplicabilidad real de estas habilidades en el entorno laboral.
- Análisis de informes de práctica profesional, que recoge retroalimentación de empleadores.
- Estudio del mercado laboral, a través de plataformas como Laborum, LinkedIn y Trabajando.com, junto con una revisión de documentos de los consejos sectoriales y del perfil de egreso institucional.

**Fase 4: Diseño de Acciones de Fortalecimiento / Mejora de las Habilidades Gerenciales**

Esta fase tiene como propósito traducir las brechas detectadas en etapas anteriores en acciones formativas concretas que puedan ser implementadas en el futuro. Si bien esta fase no ejecuta aún la intervención, establece un marco preliminar para el rediseño curricular o co-curricular, alineado con el diagnóstico.

Acciones a seguir:

- Análisis cruzado de brechas identificadas: Se comparan los resultados de la medición interna (instrumentos aplicados a estudiantes) con los hallazgos externos (mercado laboral, consejos sectoriales, empleadores y egresados), priorizando aquellas habilidades y competencias con mayores déficits o mayor relevancia estratégica.
- Clasificación de habilidades por tipo y nivel: Se estructura una matriz que distingue entre:

Habilidades gerenciales operativas: como gestión del tiempo, delegación, planificación, comunicación funcional.

Competencias ejecutivas estratégicas: como liderazgo transformacional, pensamiento crítico, inteligencia emocional, gestión del cambio, visión sistémica.

- Diseño de acciones formativas tipo: Se elaboran propuestas pedagógicas específicas por categoría de habilidad, considerando:

Asignaturas existentes que podrían integrar prácticas formativas activas.

Proyectos co-curriculares (talleres, módulos, simuladores, casos integrados).

Rol futuro de tecnologías como RA, simulaciones y plataformas adaptativas, a ser aplicadas en una segunda etapa del proyecto.

- Propuesta de articulación curricular: Se esbozan rutas de incorporación de estas acciones dentro del plan de estudios vigente o como parte de programas de desarrollo profesional complementario.

**Fase 5: Implementación de Acciones Diseñadas**

Esta fase corresponde a la etapa proyectada de intervención formativa, que será desarrollada en un segundo ciclo de investigación–acción, posterior a la fase de diagnóstico actual.

Componentes previstos para su implementación:

- Desarrollo o adquisición de herramientas tecnológicas: Se considerará el diseño de entornos de simulación realistas (con o sin RA), que permitan a los estudiantes entrenar habilidades gerenciales bajo condiciones simuladas, con retroalimentación automática o guiada.
- Piloto de implementación: Se plantea como futura acción piloto la ejecución de módulos de simulación en asignaturas estratégicas del plan de estudios, especialmente aquellas relacionadas con gestión de operaciones, gestión de personas o planificación estratégica.
- Evaluación de impacto: En esta fase futura, se incluiría un modelo de evaluación comparativa (pre-test/post-test) para validar la efectividad de las acciones implementadas sobre el desarrollo de las habilidades detectadas como deficitarias.
- Documentación para mejora continua: Todo el proceso de implementación será documentado con el fin de retroalimentar a la carrera, escalar la experiencia a otras sedes o facultades, y consolidar una cultura de innovación pedagógica basada en evidencia.

## 3. RESULTADOS PRELIMINARES

Los primeros hallazgos del estudio muestran una alta convergencia entre las distintas fuentes consultadas respecto a la necesidad de fortalecer ciertas habilidades gerenciales en los estudiantes de Ingeniería Civil Industrial. A partir del análisis de más de XX ofertas laborales de plataformas especializadas, se identificaron cinco habilidades recurrentemente solicitadas: **liderazgo de equipos, toma de decisiones, pensamiento analítico, comunicación efectiva y gestión del cambio.**

Los informes de práctica profesional refuerzan estos hallazgos, revelando que los tutores de empresa valoran especialmente aspectos cómo: **proactividad, capacidad de adaptación, y la resolución de problemas, pero también reportan debilidades en la planificación operativa, la priorización de tareas y el trabajo bajo presión.**

Los focus groups con egresados (cohortes 2022, 2023) evidencian que, si bien la formación técnica es valorada, existe una percepción generalizada de que las habilidades interpersonales y ejecutivas no

fueron suficientemente abordadas durante su formación. Muchos egresados indican que solo comenzaron a desarrollar estas competencias de forma efectiva al insertarse en el mundo laboral.

Por su parte, la revisión del perfil de egreso y las mallas curriculares vigentes muestra la presencia declarativa de algunas habilidades blandas en los resultados de aprendizaje, pero sin una metodología estructurada para su desarrollo o evaluación sistemática.

En conjunto, los datos permiten establecer una brecha significativa entre el perfil de egreso declarado, las habilidades desarrolladas efectivamente en la formación, y las requeridas por el entorno profesional.

## Fase 1: Diagnóstico conceptual de habilidades gerenciales

### 1.- Antecedentes Generales:

La primera etapa del estudio se centra en la elaboración de un diagnóstico sistemático y multifuente orientado a reconocer las habilidades gerenciales más relevantes en el ámbito formativo y profesional de la Ingeniería Civil Industrial. Este diagnóstico busca articular la perspectiva académica con las demandas reales del mercado laboral, considerando tanto las tendencias internacionales en gestión como las particularidades del contexto productivo y organizacional chileno. De esta manera, se pretende identificar las competencias clave que requieren ser fortalecidas o incorporadas en el perfil de egreso, con el fin de garantizar que los estudiantes desarrollen capacidades de liderazgo, toma de decisiones estratégicas y gestión integral acordes a los desafíos actuales y futuros de la profesión.

### 2.- Detección de habilidades gerenciales del mercado laboral:

El Ingeniero Civil Industrial es uno de los perfiles profesionales con mayor demanda en el mercado laboral chileno, debido a su capacidad para integrar conocimientos técnicos y habilidades gerenciales en ámbitos de producción, logística, finanzas y gestión de proyectos. Con el fin de conocer el estado actual de su empleabilidad, se realizó una investigación en tres portales clave de búsqueda de empleo: LinkedIn, Laborum y Trabajando.com.

**Resultados preliminares:**

1. *LinkedIn*

En LinkedIn, el portal refleja 651 resultados tras buscar “Ingeniero Civil Industrial”, limitando los resultados a Chile. Las ofertas publicadas para Ingenieros Civiles Industriales destacan habilidades gerenciales como:

- Gestión de proyectos (uso de metodologías como Lean Six Sigma, mejora continua y ERP/SAP).
- Liderazgo y comunicación para dirigir equipos multidisciplinarios.
- Toma de decisiones estratégicas y resolución de problemas bajo presión.
- Innovación y gestión del cambio en procesos organizacionales.

Además, se valoran competencias blandas (empatía, adaptabilidad, trabajo en equipo) junto a la capacidad de análisis de datos y planificación estratégica.

2. *Laborum*

En Laborum, las opciones son menos. Al buscar “Ingeniero Civil Industrial”, se muestran 6 resultados; al ingresar “Ingeniero Industrial”, el resultado incrementa a 13 ofertas de empleo. Entre ellas, se encontraron múltiples vacantes recientes en áreas como operaciones, construcción y manufactura. Por ejemplo:

- “Ingeniero Junior Civil Industrial” en planta de alimentos, solicitando al menos un año de experiencia en producción.

Las tendencias observadas en las ofertas incluyen:

- Capacidad de análisis y gestión de procesos.
- Conocimiento en logística y operaciones.

- Trabajo en equipo y liderazgo incipiente.

Las vacantes muestran una alta demanda en la Región Metropolitana, pero también existen oportunidades en regiones ligadas a minería y construcción.

*3. Trabajando.com*

El portal mostró 1.292 ofertas vigentes para Ingenieros Civiles Industriales en Chile, lo que refleja una alta demanda sostenida de este perfil. Los cargos van desde analistas y coordinadores hasta jefaturas y gerencias.

Se enfatizan competencias como:

- Gestión de recursos y control de indicadores.
- Planificación estratégica.
- Resolución de problemas complejos.

La diversidad de sectores que requieren este perfil (retail, minería, banca, manufactura) confirma su versatilidad.

**Contexto laboral y empleabilidad:**

Según datos oficiales y portales especializados:

- Empleabilidad: 85 %–92 % durante el primer año de titulación. *(Advance UNAB, 2024).*
- Ingreso promedio primer año: CLP 1,7 millones mensuales. *(Advance UNAB, 2025).*
- Ingreso al 5.º año: cerca de CLP 2,7 millones mensuales.
- En sectores como minería, los ingresos pueden superar ampliamente estos promedios gracias a bonos y beneficios.

**3.- Detección de habilidades desde informes de práctica industrial y profesional:**

Análisis de Prácticas (Industriales y Profesionales)

Distribución de empresas en las que estudiantes de Ingeniería Civil Industrial realizaron su práctica industrial y/o profesional durante el período 2021-2024.

| Rubro | Nº de Estudiantes |
|---|---|
| Producción y Operaciones | 232 |
| Alimentos y Servicios de Alimentación | 65 |
| Construcción | 61 |
| Transporte | 35 |
| Electricidad | 24 |
| Educación | 22 |
| Salud | 21 |
| Minería | 18 |
| Bancos y Finanzas | 17 |
| Finanzas | 17 |
| Telecomunicaciones | 17 |
| Asesorías y Servicios en Computación e Informática | 16 |
| Medioambientales | 15 |
| Marketing | 11 |

| | |
|---|---|
| Capacitación | 7 |
| Auditores y Contabilidad | 5 |
| Industria Naval | 4 |
| Consultores en Recursos Hídricos | 3 |
| Hoteles | 2 |
| Turismo | 2 |
| Abogados - Jurídicos | 1 |
| Total general | 595 |

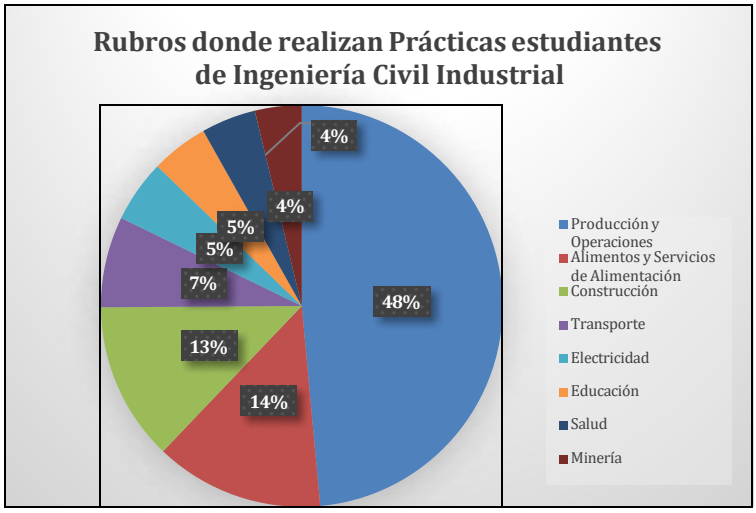



Tabla con resumen de elementos del perfil de egreso relacionados con las cinco habilidades recurrentes identificadas, indicando si fueron o no evaluadas en la práctica

| Dimensión | Evaluado | % | No evaluado | % | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| Liderazgo de equipo: | | | | | |
| Colabora en equipos multidisciplinarios de mejora continua, mostrando compromiso, disciplina, pasión por el trabajo bien hecho, integridad, honestidad, empatía y superación | 324 | 54% | 271 | 46% | 595<br>100% |
| Aplica habilidades ejecutivas para la solución de conflictos y el logro de los objetivos de la organización a través del trabajo en equipo multidisciplinario | 186 | 31% | 409 | 69% | 595<br>100% |
| Toma de decisiones: | | | | | |
| Propone soluciones viables a distintos problemas propios de la ingeniería industrial, que permitan optimizar el quehacer de la organización, velando por el cumplimiento de las normas éticas de la profesión | 254 | 43% | 341 | 57% | 595<br>100% |
| Evalúa datos para crear información técnica y de gestión relevante para la toma de decisiones, considerando las distintas perspectivas de los grupos de interés | 318 | 53% | 277 | 47% | 595<br>100% |
| Pensamiento analítico: | | | | | |
| Analiza los fenómenos e impactos sociales y naturales que subyacen a la actividad industrial, considerando las posiciones de los | 100 | 17% | 495 | 83% | 595<br>100% |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| distintos grupos de interés en relación a la actividad de la organización | | | | | |
| Evalúa distintas alternativas de solución a problemáticas organizacionales, considerando las necesidades de esta misma y de los grupos de interés involucrados. | 223 | 37% | 372 | 63% | 595<br>100% |
| Comunicación efectiva | | | | | |
| Explica las dinámicas, flujos e interrelaciones de los procesos productivos y administrativos de una organización de manera sistémica y holística | 232 | 39% | 363 | 61% | 595<br>100% |
| Comunica de manera asertiva y efectiva la información relacionada con el estado de los procesos productivos, estrategias empresariales y decisiones de inversión | 224 | 38% | 371 | 62% | 595<br>100% |
| Gestión del cambio | | | | | |
| Detecta posibilidades de mejora de los procesos de una organización a través del análisis del desempeño, identificando las causas de ineficiencias y evaluando cursos de acción | 47 | 8% | 318 | 52% | 595<br>100% |
| Evalúa las necesidades de mejora tecnológica en los procesos de una empresa, cuyo perfeccionamiento se resuelve a través de innovación; investigando, analizando y proponiendo alternativas tecnológicas | 205 | 34% | 390 | 66% | 595<br>100% |

El diagnóstico evidencia que, si bien las prácticas profesionales constituyen una instancia clave para la formación integral de los estudiantes de Ingeniería Civil Industrial, en muchos casos presentan limitaciones respecto a su pertinencia y alineación con el perfil de egreso. A nivel nacional, diversos informes académicos y experiencias universitarias han mostrado que un porcentaje significativo de estas prácticas se concentra en funciones operativas o administrativas, lo que restringe la posibilidad de aplicar y consolidar competencias gerenciales tales como liderazgo, gestión estratégica, innovación y toma de decisiones en contextos complejos (Maldonado et al., 2021). Esta situación es consistente con hallazgos internacionales, donde se plantea que las prácticas deben ser rediseñadas para favorecer aprendizajes experienciales y el desarrollo de habilidades de empleabilidad en entornos reales de trabajo (Jackson, 2015; Coll & Zegwaard, 2020).

## 4.- Habilidades requeridas por los egresados:

En esta etapa metodológica se aplicó un focus group el miércoles 13 de agosto de 2025, en modalidad híbrida, con sede presencial en el Campus Los Leones, Santiago de la Universidad San Sebastián. Participaron en la sesión los profesores Jaime Miranda Fierro (líder del proyecto), Naudy Leal Wilhelm, tres titulados en formato presencial y online. La sesión fue moderada por Javiera Orellana Borgheresi e incluyó una breve encuesta inicial en formato físico.

### Aplicación Focus Group:

Contenido principal y principales dimesiones:

#### Dimensión 1: Experiencias profesionales y habilidades en uso

Durante el focus group, los/as participantes describieron experiencias diversas en el ejercicio profesional, destacando que la mayoría ha asumido roles que exigen liderazgo, coordinación de equipos y toma de decisiones. Una constante fue la presencia de responsabilidades gerenciales incluso en etapas tempranas de la vida laboral, como lo expresó uno de los participantes:

“Tuve que liderar proyectos apenas entré, no había un manual, y ahí uno aplica lo que puede recordar o resolver en el momento” (Mariano Galdames).

Se identificaron habilidades clave utilizadas: comunicación efectiva, resolución de conflictos, gestión del tiempo, liderazgo situacional, y toma de decisiones bajo presión. Estas competencias fueron desarrolladas en parte mediante la experiencia directa, más que en el entorno universitario.

**Dimensión 2: Formación universitaria: fortalezas y vacíos**

Respecto a la preparación recibida durante la carrera, las opiniones fueron mixtas. Por un lado, se valoraron asignaturas prácticas, trabajos en equipo y experiencias como ayudantías o participación en proyectos extracurriculares. Sin embargo, surgieron críticas a la falta de espacios sistemáticos y profundos para desarrollar habilidades blandas de forma consciente:

“La universidad te da harto conocimiento técnico, pero hay pocas instancias para trabajar lo interpersonal, como saber comunicarte con un equipo o enfrentar conflictos reales” (Mariano Galdames).

Los participantes mencionaron que habilidades como la comunicación interpersonal, capacidad de exposición frente a un gran y/o importante público, el liderazgo en contextos de presión y la capacidad de adaptación fueron desarrolladas fuera del entorno académico, ya sea en el trabajo, actividades extracurriculares o situaciones de vida personal.

**Dimensión 3: Propuestas para la mejora formativa**

A partir de sus experiencias, los/as egresados/as propusieron diversas formas de fortalecer la formación en habilidades gerenciales. Entre las sugerencias más recurrentes destacan:

- Incorporar instancias prácticas simuladas, como juegos de rol, toma de decisiones bajo presión o gestión de conflictos.
- Utilizar simuladores y tecnologías de realidad aumentada, especialmente en entornos como el centro de simulación de la universidad, para generar situaciones realistas.
- Fortalecer las metodologías activas (aprendizaje basado en problemas, estudio de casos, proyectos interdisciplinarios).
- Establecer una asignatura específica sobre habilidades gerenciales, que no esté subordinada a los contenidos técnicos.

Una de las ideas más valoradas fue la posibilidad de vivir experiencias similares a las del mundo laboral real dentro del aula, mediante casos o decisiones con consecuencias simuladas.

**Caracterización de los participantes:**

En el focus group participaron tres egresados del año 2022 de la carrera de Ingeniería Civil Industrial de la Universidad San Sebastián, todos con experiencia laboral en áreas donde han debido aplicar habilidades gerenciales. A continuación, se presenta una breve caracterización:

- Profesional N1: Experiencia en liderazgo técnico y coordinación de equipos. Aporta una mirada crítica sobre la preparación universitaria y el enfoque de las asignaturas orientadas al desarrollo de habilidades blandas.
- Profesional N2: se desempeña en un entorno que requiere habilidades comunicacionales y toma de decisiones. Sus intervenciones aportaron claridad respecto a la brecha entre el conocimiento técnico entregado en la universidad y las demandas del entorno laboral real.
- Profesional N3: con experiencia en procesos de mejora operativa, destacó la necesidad de enfrentar desafíos sin preparación explícita, desarrollando habilidades en terreno.

Esta diversidad de trayectorias permitió observar cómo las habilidades gerenciales son puestas en práctica en distintos contextos, y cómo la formación académica influye (o no) en su desarrollo efectivo.

## 4. CONCLUSIONES

Este estudio permite identificar, mediante una metodología de triangulación múltiple, un conjunto de habilidades gerenciales y competencias ejecutivas críticas para el ejercicio profesional del ingeniero civil industrial, cuyo desarrollo en la formación universitaria presenta aún niveles heterogéneos. El enfoque diagnóstico, basado en fuentes internas (estudiantes, egresados, documentos institucionales) y externas (mercado laboral, empleadores y consejos sectoriales), entrega evidencia empírica consistente para fundamentar decisiones pedagógicas y curriculares orientadas al fortalecimiento de estas capacidades.

Se concluye que existe una necesidad urgente de integrar estrategias formativas activas, progresivas y de carácter experiencial, que preparen a los estudiantes para enfrentar un entorno profesional caracterizado por la transformación digital, la industria 4.0 y la creciente incertidumbre organizacional (Coll & Zegwaard, 2020; World Economic Forum, 2023). En este sentido, la incorporación de entornos de simulación, metodologías basadas en casos y tecnologías inmersivas se posiciona como una vía coherente con las tendencias globales en educación en ingeniería y con las demandas del mercado laboral chileno.

El proyecto sienta así las bases para una segunda etapa de innovación pedagógica, orientada al cierre de brechas en habilidades blandas y gerenciales, y al mejoramiento continuo del perfil de egreso. Esto permitirá no solo consolidar la empleabilidad y capacidad de adaptación de los egresados, sino también contribuir al posicionamiento estratégico de la carrera frente a los desafíos de la industria nacional e internacional.

**Focus:**

Se presentan algunas conclusiones emergentes a partir de la aplicación del Focus Groups:

- Presencia temprana de funciones gerenciales: los egresados enfrentan responsabilidades relacionadas con liderazgo, toma de decisiones, coordinación de equipos y resolución de problemas desde las primeras etapas de su inserción laboral. Estas funciones exigen competencias que no siempre fueron abordadas explícitamente durante la formación universitaria.
- Brechas en la formación en habilidades blandas: aunque la carrera entrega una base técnica sólida, los participantes coinciden en que la preparación en habilidades blandas fue insuficiente o incidental. Aspectos como la comunicación, el liderazgo situacional o el manejo de conflictos suelen desarrollarse en el entorno laboral, por ensayo y error.
- Necesidad de experiencias formativas más reales y prácticas: los egresados valoran la idea de incorporar metodologías activas, simulaciones, casos reales y entornos controlados donde se enfrenten a decisiones estratégicas, trabajo colaborativo y resolución de conflictos, anticipando así las dinámicas reales del trabajo profesional.

Estos hallazgos respaldan la importancia de repensar el enfoque formativo, integrando de manera estructural el desarrollo de habilidades gerenciales en el currículo de Ingeniería Civil Industrial, como eje transversal del perfil de egreso.

**Prácticas:**

En consecuencia, se hace necesario replantear las actividades de práctica que se realizan en la carrera a nivel nacional, de manera que se orienten hacia experiencias con mayor pertinencia respecto del perfil de egreso y las habilidades recurrentes identificadas en el presente estudio. Asegurar prácticas con un enfoque más estratégico e interdisciplinario permitirá no solo una mayor vinculación con los desafíos reales de la industria, sino también un fortalecimiento de la empleabilidad, la adaptabilidad y la capacidad de los futuros ingenieros para generar valor en entornos organizacionales dinámicos (World Economic Forum, 2023).

**Mercado del Trabajo:**

El análisis de los tres portales permite afirmar que el Ingeniero Civil Industrial es altamente demandado en el mercado laboral chileno, con ofertas que abarcan diversos sectores productivos.

- LinkedIn evidencia las habilidades gerenciales más solicitadas.
- Laborum muestra la diversidad de ofertas recientes y los requisitos de experiencia.

- Trabajando.com refleja la gran cantidad de vacantes disponibles.

Esto confirma que la carrera posee una alta empleabilidad, buenos niveles salariales y múltiples oportunidades de desarrollo, especialmente para quienes potencien sus habilidades de liderazgo, gestión de proyectos, innovación y comunicación.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.


- Boyatzis, R. E. (2008). *Competencies in the 21st century*. Journal of Management Development, 27(1), 5–12. https://doi.org/10.1108/02621710810840730
- García-Lombardía, P., Aragón, J. A., & Sanz, C. (2001). *Desarrollo de habilidades directivas en la formación universitaria*. Revista Complutense de Educación, 12(2), 397–420.
- González, A. (2019). *Entornos de simulación para el desarrollo de habilidades gerenciales en ingeniería*. Revista Iberoamericana de Educación Superior, 10(27), 91–108. https://doi.org/10.22201/iisue.20072872e.2019.27.579
- Kolb, D. A. (2015). *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development* (2nd ed.). Pearson Education.
- Leff, E. (2000). *La complejidad ambiental*. Revista Polis, 2(4), 1–20.
- Mendoza, C. (2018). *Simulación de liderazgo organizacional en programas de formación profesional*. Revista Estudios Gerenciales, 34(147), 318–328. https://doi.org/10.18046/j.estger.2018.147.2822
- Miranda Fierro, J. F. (2019). *La universidad como sinónimo de universalidad, pluralismo, integridad y totalidad…* En *INGLOMAYOR, Section A Volume 17* (p. 43). ISSN 0719-7578.
- Moldoveanu, M., & Narayandas, D. (2019). *The Future of Leadership Development*. Harvard Business Review. https://hbr.org/2019/03/the-future-of-leadership-development
- Pérez, L. (2019). *Competencias comunicacionales en simulaciones de entornos virtuales*. Revista Formación Universitaria, 12(5), 55–66. https://doi.org/10.4067/S0718-50062019000500055
- Salas, E., Wildman, J., & Piccolo, R. (2009). *Using simulation-based training to enhance management education*. Academy of Management Learning & Education, 8(4), 559–573. https://doi.org/10.5465/amle.8.4.zqr559
- World Economic Forum. (2023). *The Future of Jobs Report 2023*. https://www.weforum.org/reports/future-of-jobs-report-2023
- Díaz, R. (2017). *Gestión del tiempo y presión en entornos simulados: una experiencia universitaria*. Revista Innovación Educativa, 17(74), 25–40. https://doi.org/10.24310/ie.v17i74.2927
- Coll, R. K., & Zegwaard, K. E. (2020). *Exploring the relevance of work-integrated learning for engineering employability*. Journal of Engineering Education, 109(2), 307–324. https://doi.org/10.1002/jee.20312
- Jackson, D. (2015). *Employability skill development in work-integrated learning: Barriers and best practice*. Studies in Higher Education, 40(2), 350–367. https://doi.org/10.1080/03075079.2013.842221
- Maldonado, V., Rebolledo, J., & Vera, L. (2021). *Prácticas profesionales en ingeniería: pertinencia y desafíos en la formación universitaria chilena*. Formación Universitaria, 14(3), 85–98. https://doi.org/10.4067/S0718-50062021000300085
- World Economic Forum. (2023). *Future of Jobs Report 2023*. World Economic Forum. https://www.weforum.org/reports/future-of-jobs-report-2023


**INTERNET.**


- Advance UNAB. (2024, abril 5). Empleabilidad de carreras: ¿Por qué Ingeniería tiene alta demanda? Universidad Andrés Bello. https://advance.unab.cl/noticia/empleabilidad-carreras-por-que-ingenieria-tiene-alta-demanda/
- Advance USS. (2024, mayo 15). Ingeniería Civil Industrial: la carrera mejor pagada y con mayor futuro. Universidad San Sebastián. https://advance.uss.cl/noticia/ingenieria-civil-industrial-la-carrera-mejor-pagada-y-con-mayor-futuro/
- Instituto Profesional Providencia (IPP). (2024, marzo 20). Carreras mejores pagadas al primer año de egreso. https://ipp.cl/general/carreras-mejores-pagadas-al-primer-ano-de-egreso/

- Laborum. (2025). Empleos área Ingeniería Civil y Construcción en Chile. https://www.laborum.cl/empleos-area-ingenieria-civil-y-construccion.html
- LinkedIn. (2025). Ofertas de empleo para Ingeniero Civil Industrial en Chile [Sitio web]. https://www.linkedin.com/jobs/
- Trabajando.com. (2025). Ofertas de empleo para Ingeniero Civil Industrial en Chile. https://www.trabajando.cl/trabajo-ingeniero-civil-industrial



**Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean agradecer a la carrera de Ingeniería Civil Industrial U. San Sebastián, junto al hospital de Simulación Clínica USS con quienes nos encontramos trabajando colaborativamente en pro de este proyecto. También agradecer a la escuela de Diseño Digital e Industrias Creativa, Facultad: Arquitectura, Arte y Diseño junto a su director Carlos Hinrichsen.

# ANEXO 1 – Test de Habilidades Gerenciales

Test De Habilidades Gerenciales

Encuesta desarrollada por (García-Lombardía et al., 2001)

Nombre:

Fecha:

Último Nivel de estudios: 1er / 2do / 3er / 4to/ 5to Año

Realiza o Realizó Práctica Laboral u otra: SI / NO

*Nota: Esta Encuesta y el uso de la información que ingrese; es solo con fines académicos e investigativos para la institución.*

**Test de Habilidades Gerenciales**

| **Descripción** | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.- Reconoce y aprovecha las oportunidades, los peligros y las fuerzas externas que aparecen en el contexto de la formación Universitaria (Ej: fondos concursables, proyectos colaborativos; iniciativas internas, becas). | | | | | |
| 2.- Mira más allá de los límites de su actividades académicas, comprende el impacto de sus acciones en otras personas / equipos y desarrolla cooperación intergrupal. (ej; Crear grupos de trabajo, da ideas a un grupo u otro dependiendo de la necesidad) | | | | | |
| 3.- Utiliza los recursos del modo más idóneo, rápido, económico y eficaz para obtener los resultados deseados (ej; distribuye el tiempo adecuadamente entre distintas actividades, se asignan tareas a los miembros de un equipo). | | | | | |
| 4.- Responde con prontitud y eficacia a las sugerencias y necesidades del profesor / grupo / compañero (ej; responde oportunamente a las consultas del profesor, cumple oportunamente con los criterios entregados en las evaluaciones) | | | | | |
| 5.- Desarrolla y mantiene una amplia red de relaciones con compañeros y amigos dentro y fuera de la universidad (ej; se relaciona con el CCAA de su carreras, se relaciona con estudiantes de otras carreras, participa en grupos externos a la Universidad). | | | | | |
| 6.- Consigue llegar a acuerdos que satisfacen los intereses de ambas partes. (Ej: profesor-estudiante; profesor-grupo de trabajo; dirección de carrera-estudiante). | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 7.- Escucha y transmite ideas de manera efectiva, empleando tanto procedimientos formales como informales, y proporcionando datos concretos para respaldar sus observaciones y conclusiones | | | | | |
| 8.- Asigna objetivos y tareas a las personas adecuadas para realizar el trabajo, y planifica su seguimiento (ej; planifica la ejecución de una tarea y asigna roles a sus compañeros de equipo). | | | | | |
| 9.- Se preocupa de que los integrantes de su equipo dispongan de la capacidad de tomar decisiones y de los recursos necesarios para lograr sus objetivos (ej; delega actividades académicas asignadas a los grupos de trabajo, distribuyendo las cargas de trabajo de forma equitativa). | | | | | |
| 10.- Ayuda a sus compañeros a descubrir sus áreas de mejora y a desarrollar sus habilidades y capacidades académicas (ej; participa como ayudante, tutor y/o partner, potencia las habilidades de sus compañeros) | | | | | |
| 11.- Fomenta un ambiente de colaboración, comunicación y confianza entre los miembros de su equipo, y los estimula hacia el logro de los objetivos comunes. | | | | | |
| 12.- Da sentido al trabajo de sus compañeros, animando, ilusionando y motivándoles a conseguir los objetivos que les propone (ej; se considera un líder participativo dentro de su grupo). | | | | | |
| 13.- Sabe identificar con rapidez las causas de los problemas y los puntos clave de una situación. | | | | | |
| 14.- Distingue y separa los factores relevantes de una situación y sabe cuantificar su importancia (ej; es capaz de priorizar el bien común versus los intereses personales). | | | | | |
| 15.- Tiene capacidad de síntesis a la hora de tomar decisiones (ej; toma decisiones rápidamente teniendo como base la información disponible). | | | | | |
| 16.- Muestra un comportamiento emprendedor, iniciando y empujando los cambios necesarios con tenacidad y autonomía personal. | | | | | |
| 17.- Genera planteamientos y soluciones innovadoras y creativas a los problemas que se le presentan. | | | | | |
| 18.- Ve las situaciones y los problemas desde su aspecto más favorable (optimista). | | | | | |
| 19.- Mantiene un alto grado de atención ante uno o varios problemas durante un largo período de tiempo. | | | | | |
| 20.- Controla sus emociones y actúa de manera apropiada ante distintas personas y situaciones. | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 21.- Hace lo que se ha propuesto realizar, sin abandonar su propósito a pesar de la dificultad de llevarlo a cabo. | | | | | |
| 22.- Prioriza sus objetivos, programando sus actividades de manera adecuada y ejecutándolas en el tiempo previsto. | | | | | |
| 23.- Mantiene el equilibrio personal y emocional ante situaciones de especial tensión. | | | | | |
| 24.- Afronta con valentía la toma de decisiones en situaciones de gran responsabilidad y alto riesgo. | | | | | |
| 25.- Muestra un comportamiento transparente y cumple sus promesas. | | | | | |
| 26.- Da y exige lo que corresponde a cada uno sin discriminar, menospreciar o disminuir a las personas. | | | | | |
| 27.- Se comporta de manera recta y honrada ante cualquier situación. | | | | | |
| 28.- Evalúa con frecuencia y profundidad su propio comportamiento y la realidad que le circunda (ej; ante una mala calificación me pregunto qué hice mal o en qué falle y cómo puedo mejorar). | | | | | |
| 29.- Conoce sus puntos fuertes y sus puntos débiles, tanto en el ámbito académico como personal. | | | | | |
| 30.- Muestra flexibilidad para cambiar sus comportamientos, a fin de fortalecer sus puntos fuertes y superar sus puntos débiles. | | | | | |

**ANEXO 2 – Encuesta-Focus**

# Encuesta de Apoyo - Investigación sobre Habilidades Gerenciales en el Entorno Laboral

Esta encuesta forma parte de una investigación académica que busca identificar, analizar y comprender las habilidades gerenciales desarrolladas por egresados/as de Ingeniería Civil Industrial de la Universidad San Sebastián en sus contextos laborales reales. Los resultados permitirán comprender el grado de desarrollo de estas competencias y orientar propuestas de mejora en la formación universitaria, fortaleciendo el perfil de egreso de la carrera. Esta información servirá como insumo para el proyecto de título de la estudiante Javiera Orellana Borgheresi, bajo la guía de los profesores Naudy Leal Wilhelm y Jaime Miranda Fierro.

* Obligatoria

## Consentimiento, Autorización Voluntaria e Identificación Personal

1. Declaro que he sido informado/a sobre el objetivo de esta encuesta y que mi participación es completamente voluntaria. Comprendo que: - Puedo abstenerme de responder cualquier pregunta que no desee. - Puedo retirarme en cualquier momento, sin consecuencias negativas.- La información recopilada se utilizará exclusivamente con fines académicos e investigativos.- Las respuestas serán tratadas de manera confidencial y anónima. Al aceptar, confirmo que acepto participar en esta actividad bajo las condiciones descritas. *

   ◯ Sí acepto

   ◯ NO acepto

2. Nombre y apellidos *

3. Año de egreso *

4. ¿Actualmente está trabajando? *

   *Si actualmente estás sin trabajo, básate en tu última experiencia laboral para responder la encuesta.

   ◯ Si

   ◯ No

5. Empresa u organización donde trabaja: *

6. Cargo en el que trabaja: *

7. Antigüedad laboral: *

*Indicar su periodo trabajado en la empresa/organización indicada.

8. Información de contacto: *

*Se solicita correo personal. Si deseas, puedes incluir número telefónico de contacto.

## Concepto Clave: Habilidades Gerenciales

Durante la actividad se abordarán conceptos clave, en particular el de *habilidades gerenciales*. Con el fin de unificar la comprensión del término, se presentan a continuación dos definiciones de referencia:"Conjunto de competencias y capacidades interpersonales que permiten a los profesionales liderar equipos, tomar decisiones estratégicas, gestionar recursos y adaptarse a entornos cambiantes, contribuyendo al logro de los objetivos organizacionales" (Cárdenas, 2018)."Capacidad que integran el liderazgo, la comunicación efectiva, la coordinación de equipos y la toma de decisiones, esenciales para gestionar procesos y alcanzar metas organizacionales de manera eficiente" (González, 2019).

## Autoevaluación

9. Lea las sentencias y marque según su experiencia laboral. *

Marque con una "X" el número que refleje tu nivel de acuerdo: (1: Muy en desacuerdo / 5: Muy de acuerdo / NA: no aplica, no se ha presenciado una experiencia)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | NA |
|---|---|---|---|---|---|---|
| He liderado equipos o coordinado tareas grupales en mi entorno laboral. | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ |
| Me siento preparado/a para tomar decisiones rápidas en contextos de presión. | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ |
| Mantengo una comunicación efectiva y asertiva con distintos niveles jerárquicos. | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ |
| Logro organizar mis tareas y tiempos para cumplir con mis responsabilidad es laborales. | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ |
| Delego funciones o tareas considerando las fortalezas del equipo. | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ |
| Analizo información y situaciones para tomar decisiones estratégicas. | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ | ◯ |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Me adapto con agilidad a cambios, imprevistos o nuevos desafíos en el entorno laboral. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Soy consciente de mis fortalezas y áreas de mejora en el ejercicio de habilidades gerenciales. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Las habilidades gerenciales (liderazgo, comunicación, resolución de problemas) son claves en mi desempeño profesional. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

10. Considero que mi formación de pregrado en la USS, me entregó herramientas útiles para desarrollar funciones gerenciales: *

Marque con una "X" el número que refleje tu nivel de acuerdo: (1: Muy en desacuerdo / 5: Muy de acuerdo / NA: no aplica, no se ha presenciado una experiencia)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | NA |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Liderazgo de equipos | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Toma de decisiones | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Comunicación efectiva | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Resolución de problemas | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Adaptación al cambio | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Gestión del tiempo | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

## Agradecimientos por su participación

Como equipo de investigación, agradecemos sinceramente tu participación en esta encuesta.Tu experiencia y opinión son fundamentales para esta investigación, y contribuirán directamente a generar propuestas que mejoren la formación profesional en nuestra carrera.Muchas gracias por tu tiempo y colaboración.

Este contenido no está creado ni respaldado por Microsoft. Los datos que envíe se enviarán al propietario del formulario.

Microsoft Forms

## ANEXO 3 – Preguntas abiertas Focus Group

**Experiencia profesional y habilidades en uso**

Obj: identificar qué habilidades utilizan los egresados en su día a día.

1. ¿Qué tipo de tareas o responsabilidades gerenciales ha tenido desde que egresó?

Ejemplos: liderar equipos de trabajo, tomar decisiones estratégicas, gestionar recursos, adaptarse a entornos cambiante y reestructuración de organizaciones

2. ¿Qué habilidades gerenciales siente que más utiliza en su trabajo?
3. ¿Recuerda alguna situación en la que una habilidad gerencial marcó una diferencia en su desempeño?

**Formación recibida en pregrado**

Obj: evaluar cuánto contribuyó la universidad al desarrollo de esas habilidades.

1. ¿Siente que la formación universitaria le preparó adecuadamente para enfrentar estos desafíos? ¿Por qué?
2. ¿Qué instancias dentro de la carrera (asignaturas, prácticas, talleres, proyectos, etc.) te ayudaron más a desarrollar habilidades blandas o gerenciales?
3. ¿Hubo habilidades que tuviste que aprender en el trabajo porque no se abordaron durante la carrera, aparte de las ya mencionadas?

**Propuestas para la formación actual**

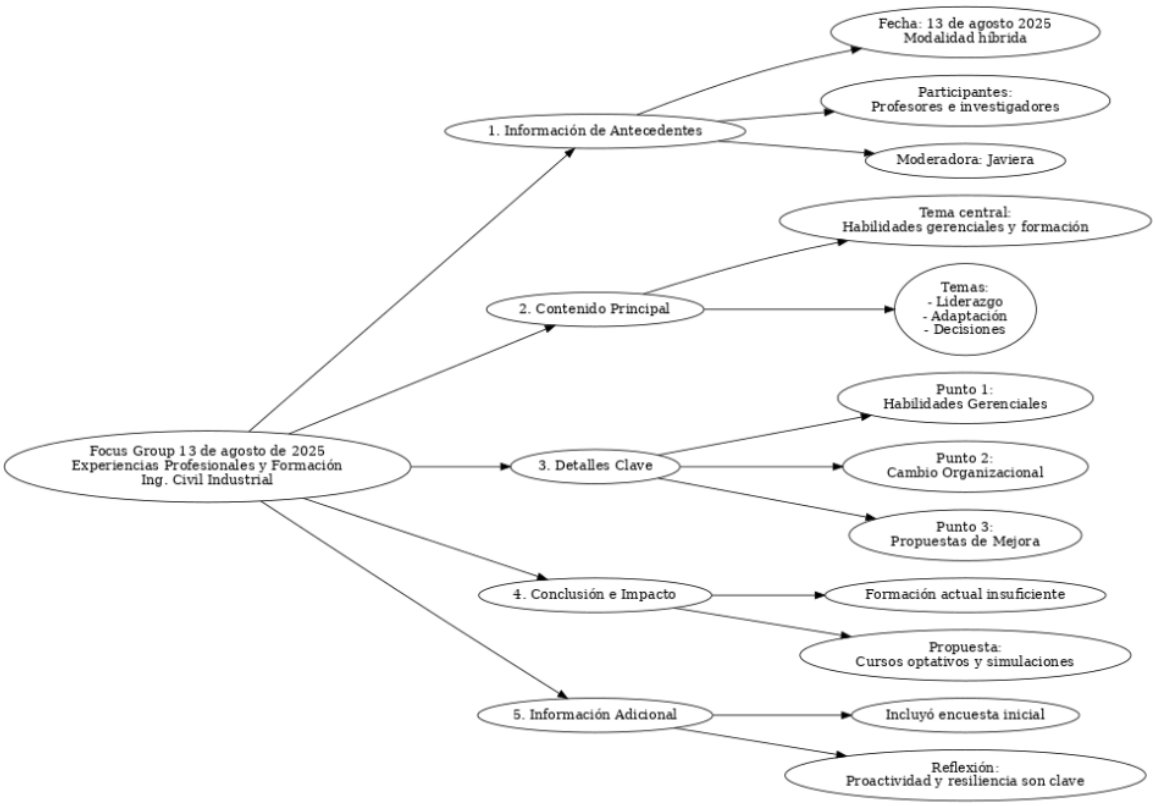
Obj: recoger ideas para mejorar el plan formativo de estudiantes actuales.

1. ¿Qué sugerencias daría para mejorar la formación en habilidades gerenciales en la carrera? ¿Qué tipo de actividades o metodologías le habrían ayudado más a prepararte para su realidad laboral actual?

fusionar

2. ¿Qué opina sobre el uso de tecnologías como simulaciones o realidad aumentada para desarrollar estas habilidades?
3. ¿Cómo contribuirías a la formación de futuros Ingenieros Civil Industriales de la Universidad San Sebastián?

## ANEXO 4 – Mindmap



# LAS COMPETENCIAS DEL INGENIERO INDUSTRIAL EN LA ERA DIGITAL: UN ANÁLISIS DE LOS NUEVOS CONOCIMIENTOS PROFESIONALES

Gómez, Mónica Cecilia; Cocci Olea, Nazareno Nicolás; Deschutter, Nahuel Enrique; Jara, Facundo Manuel

*Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC*
*monica.gomez@unc.edu.ar*
*Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC*
*nazareno.cocci@unc.edu.ar*
*Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC*
*nahueldeschutter001@mi.unc.edu.ar*
*Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC*
*facundo.jara@mi.unc.edu.ar*

**RESUMEN**

El artículo forma parte de un proyecto de investigación orientado a vincular las competencias adquiridas en la formación académica de Ingeniería Industrial con las demandas del entorno profesional en relación con las nuevas tecnologías. La necesidad de profundizar en competencias vinculadas a la transformación digital surgió en una investigación previa, lo que motivó el desarrollo de esta nueva etapa centrada específicamente en ese eje.

El objetivo del estudio es analizar el perfil profesional de los graduados de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, a través de una herramienta de relevamiento ya implementada en formato de encuesta. Esta encuesta indaga sobre datos personales y laborales como edad, año de graduación, localización del empleo, tamaño de la organización, puesto ocupado, sector y área de desempeño, con el fin de contextualizar el uso de tecnologías según las características del entorno laboral de cada profesional.

Además, se consulta sobre el uso de diversas tecnologías, las marcas específicas con las que se trabaja y la percepción acerca de cuáles serán más relevantes en el futuro y en qué áreas organizacionales. El diseño de la encuesta se basa en definiciones surgidas en etapas anteriores del proyecto y en un relevamiento del estado del arte en Industria 4.0 y transformación digital.

Los resultados permitirán detectar brechas entre la formación universitaria y las competencias tecnológicas requeridas en el ámbito profesional. Esta información servirá como insumo para revisar la propuesta curricular y contribuir a la formación de ingenieros más preparados para los desafíos de un entorno productivo en constante evolución.

**Palabras Claves:** Ingeniería Industrial, Industria 4.0, Competencias, Digitalización

**ABSTRACT**

The article is part of a research project aimed at linking the competencies acquired in the academic training of Industrial Engineering with the demands of the professional environment regarding new technologies.

The need to deepen competencies related to digital transformation emerged from a previous research study, which motivated the development of this new stage specifically focused on that axis. The objective of the study is to analyze the professional profile of graduates in Industrial Engineering from the Faculty of Exact, Physical, and Natural Sciences at the National University of Córdoba, through a surveying tool already implemented in survey format. This survey inquires about personal and work-related data such as age, year of graduation, employment location, organization size, position held, sector, and area of performance, in order to contextualize the use of technologies according to the characteristics of the work environment of each professional.

In addition, there is consultation about the use of various technologies, the specific brands being worked with, and the perception of which will be more relevant in the future and in which organizational areas. The design of the survey is based on definitions arising from previous stages of the project and on a review of the state of the art in Industry 4.0 and digital transformation.

The results will allow for the identification of gaps between university education and the technological competencies required in the professional field. This information will serve as input to review the curriculum proposal and contribute to the training of engineers better prepared for the challenges of a constantly evolving productive environment.

**Keywords:** Industrial Engineering, Industry 4.0, Skills, Digitalization

## 1. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta de manera resumida los resultados más importantes de un relevamiento de competencias tecnológicas llevado a cabo en graduados de la Carrera de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFYN) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Este estudio forma parte de un proyecto de investigación orientado a vincular las competencias adquiridas en la formación académica con las demandas del entorno profesional en relación con las nuevas tecnologías.

Este trabajo es el resultado de varios años de investigación en competencias de los ingenieros industriales, que llevó a un primer análisis de las competencias de gestión en general y luego a las orientadas a las nuevas tecnologías (Gómez, Cocci Olea, Deschutter, & Jara, 2024). Si bien se encuentra un vasto desarrollo de trabajos referidos a la temática son muy pocos los específicos vinculados a la Ingeniería Industrial y las nuevas tecnologías (Gómez, Deschutter, Cocci Olea, & Jara, 2024). Esta ausencia de investigaciones refuerza la relevancia del presente trabajo, considerando además que informes como el de Nieponice (2018), destacan que el 70% de los ejecutivos encuestados sobre las bases de la Industria 4.0 señalan la falta de personal capacitado como un desafío central en la Argentina (Nieponice, Rivera, Tfeli, & Drewanz, 2018).

Estudios amplios como el de Basco y colaboradores (2018) plantean una referencia de 10 pilares tecnológicos de la Industria 4.0. Dado que existen distintos enfoques y debates acerca de qué tecnologías integran la transformación digital, se toma este planteo como referencia. Dichos pilares son: sistemas de integración de información, máquinas y sistemas autónomos, internet de las cosas (IoT), manufactura aditiva, big data y análisis de datos, computación en la nube, simulación de entornos virtuales, inteligencia artificial, ciberseguridad y realidad aumentada. Si bien muchas de estas tecnologías ya existían en estado embrionario, hoy convergen y se combinan con mayor robustez generando disrupciones significativas (Basco, Beliz, Coatz, & Garnero, 2018).

Estudios más especializados en el tema de interés como los de Sackey y Bester (2016) en Estados Unidos y Babica y colaboradores (2022) en Sudáfrica, muestran que, a pesar de las distancias culturales, existen tendencias comunes en cuanto a las competencias requeridas por los ingenieros industriales en la Industria 4.0. Entre ellas se destacan el análisis de datos, la simulación, la automatización, el internet de las cosas y la integración de sistemas ciberfísicos (Sackey & Bester, 2016). Otro punto en común entre ambas investigaciones, es la necesidad imperiosa de adaptar los planes de estudio de Ingeniería Industrial para responder a los desafíos y oportunidades de la Industria 4.0 (Babica, Billeya, Nagerb, & Wuesta, 2022).

En la actualidad este paradigma de la transformación digital o industria 4.0 implica la incorporación de nuevos profesionales que aporten a la competitividad de las organizaciones a partir de sus competencias de gestión de recursos e innovación.

En este punto es importante tomar en cuenta los aportes al concepto de competencia de Martha Alles, reconocida experta en gestión del talento, quien propone un modelo de competencias que se alinea perfectamente con las necesidades de los ingenieros industriales en la era digital. Según la autora, las competencias se dividen en tres grandes categorías (Alles, 2019): Competencias técnicas: conocimientos específicos de la disciplina, como la Ingeniería Industrial, y habilidades técnicas relacionadas con las tecnologías digitales. Competencias comportamentales: habilidades sociales, emocionales y de comunicación que permiten trabajar en equipo, resolver conflictos y liderar. Competencias conceptuales: capacidad para comprender el contexto empresarial, analizar situaciones complejas y tomar decisiones estratégicas. Por su parte Rojas y colaboradores (2021), en un trabajo desarrollado sobre competencias profesionales e Industria 4.0 en ingenieros industriales, sostiene la centralidad de competencias como la capacidad de aprender constantemente, la resiliencia o el liderazgo aún más que manejar un software específico (Rojas-Arenas, Jiménez-Medina, & Yepes-Callejas, 2021).

El objetivo del estudio es analizar el perfil profesional de los graduados a través de una encuesta. que releva datos personales y laborales -como edad, año de graduación, localización del empleo, tamaño de la organización, puesto ocupado, sector y área de desempeño- con el fin de contextualizar el uso de tecnologías en función del entorno laboral de cada profesional.

Asimismo, se indaga sobre el uso de diversas tecnologías, las marcas específicas con las que se trabaja y la percepción acerca de cuáles serán más relevantes en el futuro y en qué áreas organizacionales. El diseño de la encuesta se basa en definiciones surgidas en etapas anteriores del

proyecto y en un relevamiento del estado del arte en Industria 4.0 y transformación digital (Gómez, Deschutter, Cocci Olea, & Jara, 2024).

Complementariamente, se realizará un análisis de los programas de las materias de la currícula, identificando las competencias que debieran adquirir los estudiantes en el cursado y la bibliografía utilizada.

Los resultados permitirán detectar las tecnologías de la digitalización y la Industria 4.0 utilizadas por los ingenieros industriales egresados de la UNC, así como las brechas existentes entre su formación universitaria y las competencias tecnológicas requeridas en el ámbito profesional. Esta información servirá como insumo para revisar la propuesta curricular y contribuir a la formación de ingenieros más preparados para los desafíos de un entorno productivo en constante evolución.

## 2. METODOLOGÍA

La presente investigación se planteó como un estudio exploratorio, ya que el propósito fue examinar un fenómeno o problema poco estudiado, como vimos en la introducción (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

Dado que no se realizaron manipulaciones de las variables que influyen en el fenómeno bajo análisis, y que el trabajo se centró en observar la utilización de las tecnologías de la Industria 4.0 en los entornos profesionales de los ingenieros industriales egresados de la FCEFyN, así como la formación recibida en dicha institución, se definió un diseño no experimental, transversal y descriptivo. Es decir, los datos fueron recogidos en un único momento del tiempo, con el fin de estudiar el estado de una o más poblaciones.

El diseño metodológico respondió a la pregunta de investigación: “¿La formación actual, brindada en la carrera de grado, permite el desempeño habitual del Ingeniero Industrial en entornos donde se utilicen tecnologías 4.0?”

En primer lugar, para analizar cuáles tecnologías de la industria 4.0 son utilizadas por los profesionales graduados de ingeniería industrial, se elaboró una lista de referencia combinando las propuestas del marco teórico general, planteadas por Basco y colaboradores (2018), y aquellas señaladas en los articulos de Sackey y Bester (2016) y Babica y colaboradores (2022). A continuación se enumeran y se describe brevemente el posible uso de cada una de ellas:

- Big data y análisis avanzado: evaluación y análisis de grandes conjuntos de datos mediante inteligencia artificial y machine learning.
- Simulación y modelado virtual: creación de modelos virtuales de plantas y optimización de operaciones en tiempo real.
- Automatización y control: automatización de sistemas y redes de comunicación, uso de PLC y sistemas interoperables.
- Impresión 3D: conocimiento y aplicación de tecnologías de manufactura aditiva.
- Conectividad e IoT: integración de sistemas ciberfísicos y el Internet de las Cosas.
- Sistemas de integración de información: integración de datos y sistemas para mejorar la eficiencia.
- Máquinas y sistemas autónomos: uso de robots y sistemas autónomos, y colaboración humano-robot.
- Computación en la nube: uso de servicios en la nube para almacenamiento y procesamiento de datos.
- Inteligencia artificial: implementación de algoritmos de IA para mejorar procesos.
- Ciberseguridad: medidas de seguridad para proteger datos y sistemas.
- Realidad aumentada: uso de tecnologías de realidad aumentada para capacitación y operación.

Para cada una de estas tecnologías se estableció el grado de utilización en la vida profesional de los encuestados, mediante preguntas directas sobre frecuencia de uso. Con este fin, se definió una escala ordinal con cinco categorías:

- Diaria (al menos una vez al día)
- Semanal (al menos una vez a la semana)
- Mensual (al menos una vez al mes)

- Anual (al menos una vez al año)
- Nunca

Esta secuencia se repite para cada una de las nueve preguntas sobre tecnologías mencionadas con anterioridad, siendo complementada con otras preguntas con variables que permiten analizar en profundidad.

Además, se incluyeron en la encuesta preguntas que permitan contextuar la muestra censada, tales como edad, género, tamaño de la empresa donde trabajan, rubro, localización y área donde desempeñan su actividad dentro de la empresa, entre otras.

La población considerada fueron los egresados de Ingeniería Industrial entre los años 2016 y 2025, ambos inclusive. Los datos fueron obtenidos de la Escuela de Ingeniería Industrial de la FCEFyN-UNC y el Centro de vinculación Gestión del Conocimiento Empresarial Aplicado (CGCEA).

De los 450 egresados registrados durante el periodo mencionado, con un error del 5%, el tamaño de la muestra mínima era de 121 graduados.

Al cierre de este artículo se cuenta con 143 respuestas, lo que implica un nivel de confianza del 85%.

*Tabla 1 Muestra mínima en función del nivel de confianza.*

| Nivel de confianza (%) | Muestra Mínima |
|---|---|
| 80 | 121 |
| 85 | 143 |
| 90 | 170 |
| 95 | 208 |

Para llevar a cabo la recolección de los datos se utilizó la herramienta Google Forms, que permite construir y adaptar las encuestas en función de la necesidad del estudio y vincularlas a hojas de cálculo de manera simple y sencilla para llevar a cabo un análisis estadístico descriptivo.

## 3. RESULTADOS.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la encuesta aplicada a los egresados de Ingeniería Industrial de la FCEFyN-UNC, complementados con el análisis de los programas de la carrera. El objetivo es mostrar cómo se utilizan las tecnologías de la Industria 4.0 en la práctica profesional y detectar brechas entre la formación académica y las competencias requeridas en el entorno laboral.

El análisis de los resultados se organiza en cuatro subapartados, que reflejan las distintas secciones de la encuesta y el análisis curricular:

1. Datos personales y laborales (3.1): se describen las características demográficas y laborales de los encuestados, incluyendo edad, género, tiempo desde la graduación, tamaño y ubicación de la organización, modalidad de trabajo, sector de actividad, puesto y área de desempeño. Esta información permite interpretar los resultados de las secciones posteriores en función del contexto profesional de los graduados.
2. Uso de tecnologías de la Industria 4.0 en la profesión (3.2): se analiza la frecuencia con la que los graduados utilizan diversas tecnologías consideradas centrales en la Industria 4.0, identificando aquellas más adoptadas y las menos utilizadas en la práctica profesional.
3. Proyección de uso de tecnologías de la Industria 4.0 en la profesión (3.3): se presentan los resultados relativos a la percepción de los graduados sobre la necesidad futura de uso de ciertas tecnologías, las áreas donde serían más relevantes y las marcas o herramientas empleadas en la actualidad.
4. Análisis de programas de la carrera (3.4): se revisa la bibliografía y los contenidos de las asignaturas de los años avanzados, evaluando el grado de alineación con las competencias digitales y tecnológicas que el mercado demanda.

En conjunto, estos análisis permiten identificar tendencias de adopción tecnológica, brechas en la formación universitaria y áreas de oportunidad para fortalecer competencias digitales y tecnológicas en los futuros ingenieros industriales.

### 3.1. Datos personales y laborales.

En esta sección se presentan las características demográficas y laborales de los graduados encuestados, con el objetivo de contextualizar la muestra y comprender el perfil profesional.

La encuesta contó con la participación de 143 graduados de la carrera de Ingeniería Industrial de la FCEFyN-UNC, lo que representa un nivel de confianza del 85% respecto del universo definido para el estudio.

En relación con las características demográficas, el 69% de los encuestados se identifica con el género masculino, el 30% con el femenino y el 1% prefirió no especificar. La edad promedio es de 31 años, mientras que el tiempo promedio desde la graduación se ubica en 6 años, lo cual refleja una muestra predominantemente compuesta por profesionales jóvenes con experiencia laboral inicial e intermedia.

La siguiente imagen ilustra de manera resumida las características de la muestra.

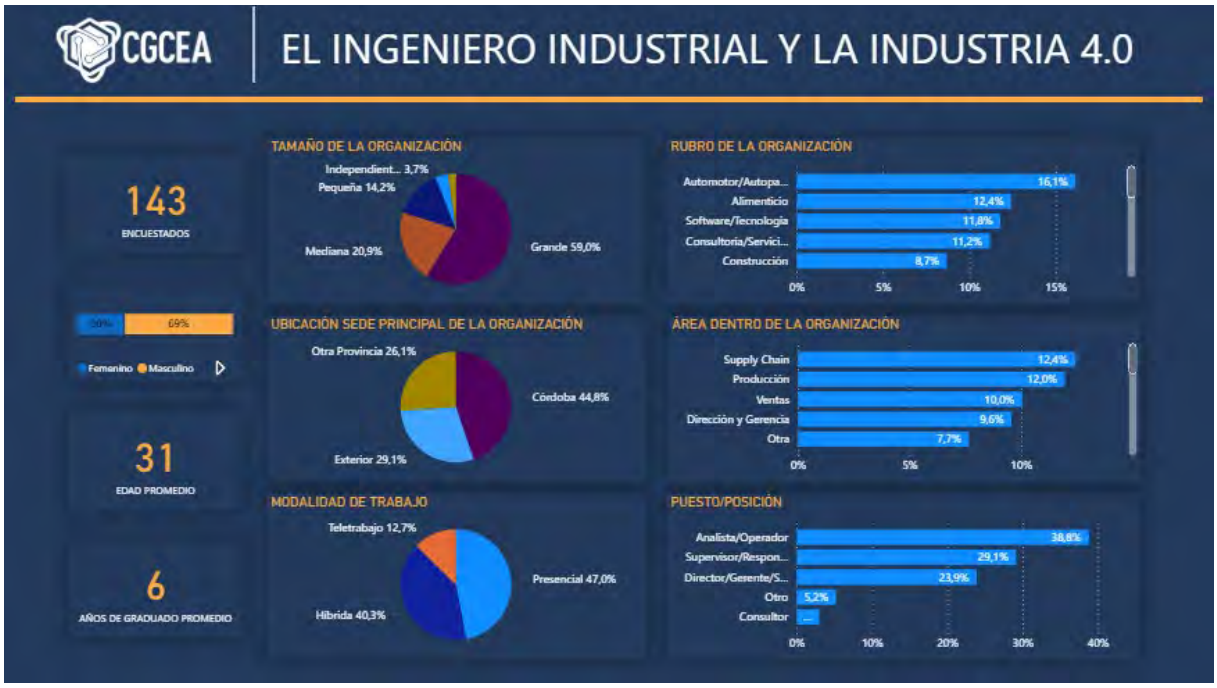



*Figura 1 Tablero con características demográficas y laborales. Fuente Elaboración propia*

Respecto al tamaño de las organizaciones en las que se desempeñan, la mayoría trabaja en empresas grandes (59,0%), seguidas por medianas (20,9%), pequeñas (14,2%) y microempresas (2,2%). Un 3,7% desarrolla su actividad en forma independiente/consultoría, lo que evidencia cierta presencia de profesionales en esquemas de autoempleo.

En cuanto a la ubicación de las sedes principales de las organizaciones, el 44,8% se encuentra en la provincia de Córdoba, el 26,1% en otras provincias de Argentina y el 29,1% en el exterior, lo que demuestra la inserción de los egresados en contextos tanto locales como internacionales.

La modalidad de trabajo reportada muestra que el 47,0% de los encuestados se desempeña de forma presencial, un 40,3% bajo un esquema híbrido y un 12,7% en modalidad remota. Estos resultados reflejan que, en el escenario post pandemia, una proporción significativa de los profesionales ha retornado a la presencialidad, aunque persisten modalidades alternativas que combinan el trabajo remoto con el presencial.

Al analizar los sectores de actividad, se observa una amplia dispersión, con mayor participación en el automotor/autopartista (16,1%), seguido por alimenticio (12,4%), software/tecnología (11,8%) y consultoría/servicios (11,2%). Otros rubros con menor representación incluyen construcción,

energético, transporte/logística, agro, finanzas/seguros, metalúrgico, petróleo/gas/minería, industria médica/farmacéutica, manufactura en general, sector público, electrónica, químico, entre otros. Cabe destacar que en este caso la sumatoria de porcentajes no alcanza al 100%, ya que los encuestados podían seleccionar más de un sector de actividad.

En cuanto al puesto que ocupan dentro de las organizaciones, la mayoría se desempeña como analista u operador (38,8%), seguido por supervisores o responsables (29,1%), mientras que un 23,9% ejerce posiciones de dirección, gerencia o subgerencia. En menor medida se identifican consultores (3%) y otras posiciones (5,2%).

Finalmente, al observar el área de desempeño, se identifican como principales espacios de inserción profesional supply chain (12,4%), producción (12%), ventas (10%) y dirección/gerencia (9,6%). También se destacan las áreas de compras (7,2%), tecnologías de la información (6,7%), servicio al cliente (6,2%) y administración (5,3%). Sectores como investigación y desarrollo, mantenimiento, calidad, proyectos, finanzas, marketing, recursos humanos y soporte técnico presentan menores porcentajes de participación. Al igual que en el caso de los sectores de actividad, la suma de los porcentajes no es total dado que se permitía seleccionar más de un área.

Estos datos permiten comprender mejor el perfil de los graduados y las condiciones en las que desarrollan su actividad profesional, sentando las bases para el análisis de la frecuencia de uso de tecnologías de la Industria 4.0 en la profesión.

### 3.2. Uso de tecnologías de la Industria 4.0 en la profesión.

En esta sección se presentan los resultados sobre la frecuencia de uso de diversas tecnologías de la Industria 4.0 por parte de los graduados, con el objetivo de identificar cuáles herramientas forman parte de la rutina profesional y cuáles aún tienen escasa adopción. El tablero donde se volcó la información permite múltiples filtros respecto a la ubicación o puesto de los encuestados, tipo de organización y tiempo de graduación, lo que además da una idea del crecimiento dentro de la empresa en la toma de decisiones. A los efectos de simplificar esta primera presentación se mantiene el filtro en TODAS, sin entrar en detalles de los que se acaban de mencionar, para tener un primer panorama.

En la siguiente imagen se puede ver los gráficos con los porcentajes de frecuencia de uso de cada tecnología consultada.




*Figura 2 Tablero con frecuencia de uso de las tecnologías consultadas. Fuente: Elaboración Propia.*

Se realizaron nueve preguntas, en algunas se combinan dos tecnologías y se ejemplifican para hacer más accesible el entendimiento de la consulta y lo que se esperaba en la respuesta. Por ejemplo: ¿Con qué frecuencia utiliza tecnologías de Big Data y Análisis Avanzado de Datos? Ej: Evaluación y análisis de grandes conjuntos de datos con herramientas como Tableau o Power BI. Otra pregunta fue: ¿Con

qué frecuencia utiliza tecnologías del Cloud Computing? Ej: Uso de servicios en la nube para almacenamiento y procesamiento de datos, desarrollo de infraestructura en Clouders como Azure, AWS, Google Cloud Platform, entre otras.

Los resultados de la encuesta revelan una marcada disparidad en la adopción de tecnologías avanzadas. Se observa un uso frecuente y significativo de herramientas relacionadas con el análisis y la gestión de la información. Específicamente, las tecnologías de Cloud Computing, Sistemas de Integración de Información y Análisis de datos son las más utilizadas de forma diaria, con el 43%, 35% y 31% respectivamente. Esto sugiere que las tareas de almacenamiento, procesamiento y gestión de datos son parte integral de la rutina profesional del ingeniero industrial, siendo esenciales para la eficiencia y la toma de decisiones.

Estos valores son aún más importantes si se considera un uso igual o superior al semanal, donde los resultados indican que el 54% de los encuestados utiliza tecnologías del Cloud Computing, el 48% realiza trabajos con Sistemas de Integración de Información y el 53% explota tecnologías vinculadas al Análisis de datos.

Adicionalmente, la Inteligencia Artificial y los automatismos (con un 20% de uso diario y un 19% de uso semanal) también muestran una adopción considerable, indicando que el ingeniero industrial emplea, de forma regular, tecnologías que permiten lograr una mayor eficiencia y rapidez en la gestión de su trabajo. En menor medida, se observa cierta tendencia del uso de tecnologías vinculadas a Ciberseguridad, con un 22% de uso diario, 6% de uso semanal y 9% mensual, sin embargo, más de la mitad de los encuestados (53%) declara no utilizarla nunca, lo que podría indicar que esta función no es una responsabilidad directa para la mayoría de los ingenieros industriales, siendo actividades vinculadas al análisis y la gestión de la información, o que las empresas tienen equipos especializados para estas tareas.

En contraste, existe una baja adopción de tecnologías vinculadas al diseño y producción, como la Fabricación Aditiva, la Realidad Aumentada, los Gemelos Digitales, los Sistemas Autónomos y el IoT. En todas estas categorías, la respuesta "Nunca" supera el 75%, lo que indica que, a pesar de su relevancia teórica en la industria 4.0, su aplicación práctica en el campo laboral de los egresados es mínima o inexistente. Este hallazgo sugiere que, aunque estas tecnologías son emergentes y con un gran potencial, no son de uso común en los roles que desempeñan estos profesionales.

En resumen, los ingenieros industriales egresados de la FCEFYN-UNC se enfocan en herramientas que les permiten gestionar, analizar y automatizar la información a gran escala, como el uso de la nube y los sistemas integrados. Por otro lado, la implementación de tecnologías físicas o de vanguardia como la robótica, la impresión 3D y el IoT es muy limitada, lo que podría reflejar un claro enfoque del perfil profesional hacia la gestión y eficiencia de los procesos y la información.

Estos datos sobre el uso actual de las tecnologías establecen un marco de referencia para analizar en la siguiente sección la percepción de los graduados sobre la necesidad futura de estas herramientas en sus áreas de trabajo.

### 3.3. Proyección de uso de tecnologías de la Industria 4.0 en la profesión.

En esta sección se resumen los resultados de las preguntas relacionadas al uso de marcas específicas de aplicaciones que utilizan las empresas donde trabajan los graduados encuestados. También se incluyen las respuestas a las preguntas de proyección orientadas a tener la percepción de los egresados respecto a la necesidad de uso de estas tecnologías y en qué áreas de su empresa serían necesarias en un futuro. Por último, se solicita se justifique por qué serían necesarias esas tecnologías en esas áreas.

Respecto a las marcas se puede ver en el gráfico el porcentaje de repetición en la elección de marcas, entre las más conocidas se encuentran aquellas vinculadas a bases de datos, cloud computing, sistemas integrados e inteligencia artificial en coincidencia con las respuestas en la frecuencia de uso, obtenidas en la sección anterior. Se citaron 60 marcas distintas de aplicaciones (de las cuales muchas tienen el mismo uso).

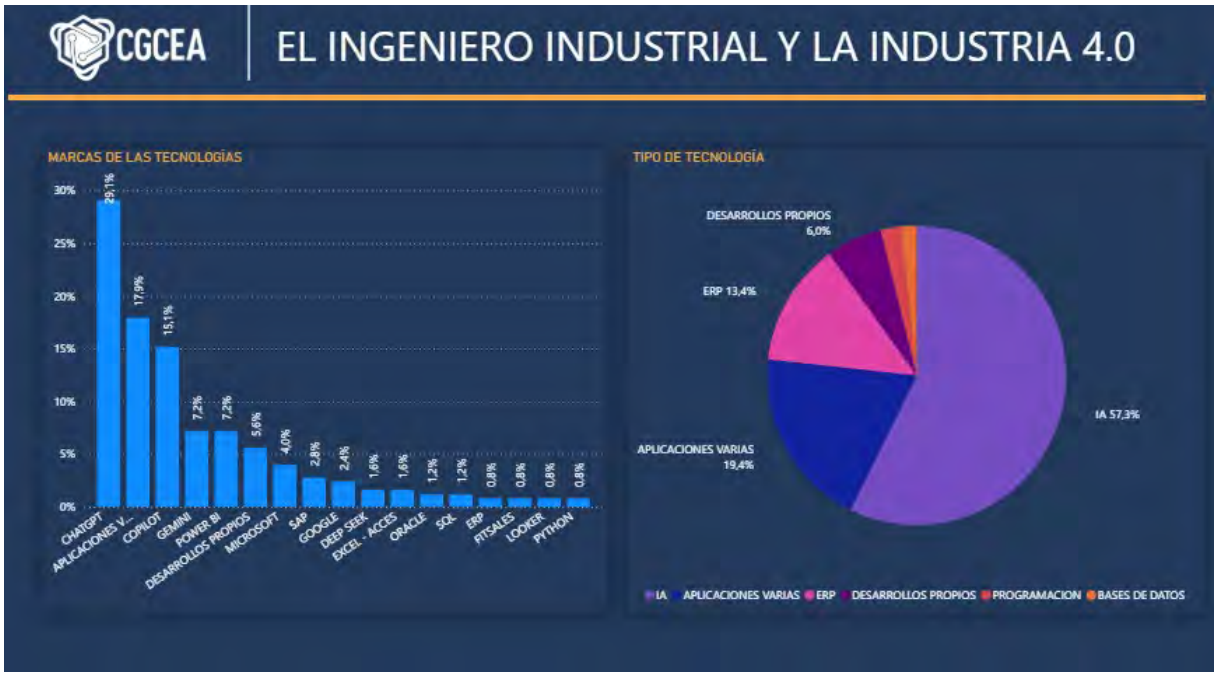



*Figura 3 Gráficos de marcas y tipos de uso de las tecnologías consultadas. Fuente: Elaboración Propia.*

Como respuesta a las preguntas de proyección en el caso de la necesidad de aplicación de tecnologías los graduados hacen referencia a potenciar el uso de bases de datos (23,4%), inteligencia artificial (21,8%) y sistemas integrados (12,3%). También se refuerza la necesidad de utilización de cloud computing (8,1%), correspondiendo con las respuestas de las preguntas de la sección anterior y se destaca en este caso la ciberseguridad (11,5%).

En este marco se referencia que las áreas que más van a necesitar la aplicación o potenciación de estas herramientas tecnológicas serán: supply chain (13,7%), en correspondencia con las áreas donde trabaja el mayor porcentaje de graduados que respondieron la encuesta, producción (13,5%), tecnologías de la información (8,7%), servicio al cliente (7,9%), mantenimiento y ventas con igual porcentaje (7%) y administración y compras (6,5%) como se ve en áreas de logística y producción, tecnologías de la Información, Sistemas y/o Soporte técnico, que son de soporte, siguiendo con la atención al cliente.

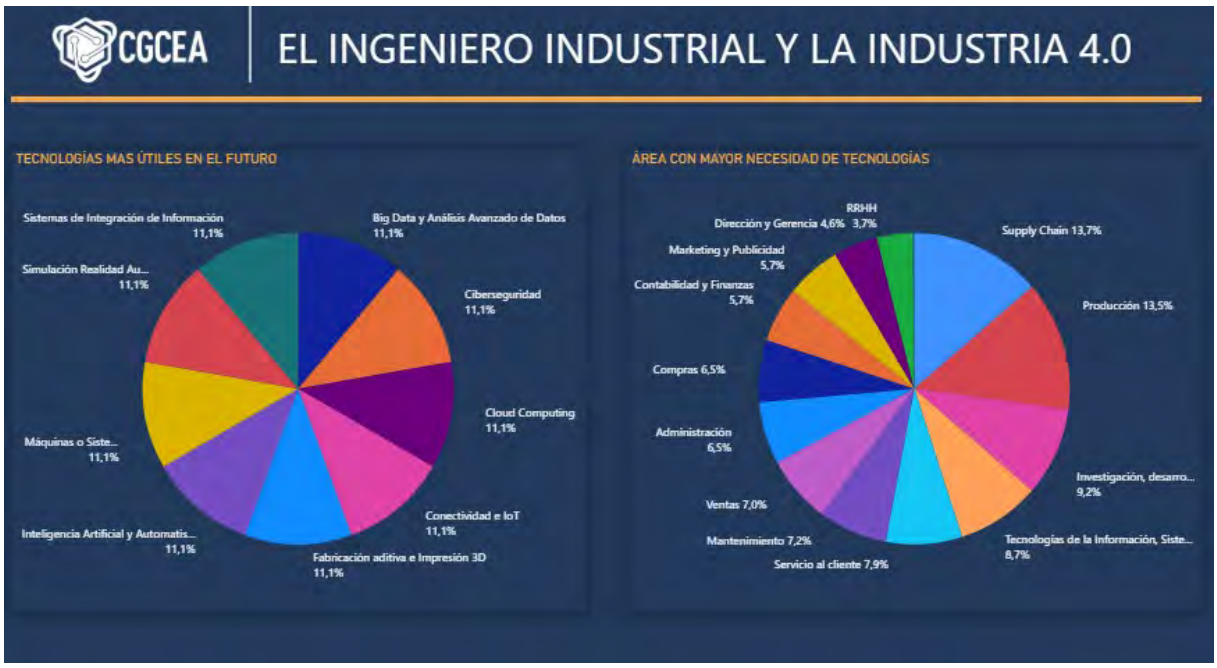



*Figura 4 Gráfico de proyección de los tipos y las áreas de necesidad uso de las tecnologías consultadas. Fuente: Elaboración Propia*

Se justifican estas respuestas en la necesidad de sistematizar el manejo actual de datos, manual, y la necesidad de mejores resultados en menor tiempo, en función de la competencia de mercado.

Con esta información sobre la percepción de necesidades futuras, se puede evaluar cómo los programas de la carrera se alinean con las competencias tecnológicas requeridas en el mercado.

### 3.4. Análisis de programas de la carrera

En esta sección se presentan los resultados del análisis de la bibliografía de las asignaturas de los años avanzados de la carrera de Ingeniería Industrial, con el objetivo de evaluar cómo los contenidos abordan competencias digitales y tecnologías de la Industria 4.0 que el mercado demanda.

Se analizó la bibliografía de 22 asignaturas y en primera instancia, se observa a nivel general que la misma no está actualizada. La mayor parte de la bibliografía corresponde a ediciones comprendidas entre los años 1990 y 2014, prácticamente con nula existencia de material vinculado a Industria 4.0 o conceptos relacionados. Entre las asignaturas analizadas, cuatro corresponden al bloque de tecnologías básicas, 16 al bloque de tecnologías aplicadas y dos al bloque de tecnologías complementarias. Dentro del primer bloque, únicamente la materia “Organizaciones e Industrias” contiene dos libros relacionados a la Industria 4.0. En cuanto al bloque de tecnologías aplicadas, la mayoría de las materias no cuentan con bibliografía relacionada a la Industria 4.0, siendo las únicas que sí lo hacen Costos Industriales, con material sobre la utilización de Excel para confección de presupuestos, Mercadotecnia, que incluye un libro sobre marketing 4.0 y Gestión de Servicios, que cuenta con un libro sobre datos digitales, sin embargo con fecha de edición del año 2001. Respecto al último bloque, se encuentra la asignatura “Innovación Tecnológica en Ingeniería Industrial”, con una bibliografía diversa y actualizada sobre conceptos de la Industria 4.0.

A partir de este análisis, se puede inferir que la formación de los actuales estudiantes respecto a los conceptos de Industria 4.0 que el mercado requiere es mínima, con escaso contenido y horas de tratamiento del tema.

## 4. CONCLUSIONES.

En función de lo expuesto, se puede observar en esta primera etapa de análisis un marcado uso de los sistemas que permiten integrar tecnologías operacionales con tecnologías de la información y la comunicación. Los sistemas integrados permiten vincular áreas de la unidad productiva y también la conectan con la cadena de valor, impactando sobre la gestión de la empresa. Por su parte, las bases de datos permiten el manejo de volumen, velocidad y variedad, facilitando el análisis para la toma de decisiones. El almacenamiento de información se realiza en la nube aprovechando una infraestructura con bajo esfuerzo administrativo.

En segundo lugar se encuentra el uso de la inteligencia artificial, cuyos algoritmos permiten el procesamiento de datos logrando aprendizaje automático lo que refuerza la seguridad y calidad en la gestión y producción.

Respecto a la ciberseguridad se puede asumir que en función de los puestos desempeñados por los graduados no sería de su responsabilidad la implementación de herramientas preventivas que permitan detectar amenazas sobre los sistemas integrados.

Los resultados permiten identificar que los graduados desarrollan competencias orientadas principalmente a la gestión de información, análisis de datos y coordinación de sistemas integrados, consolidando un perfil profesional centrado en eficiencia y toma de decisiones fundamentadas. Sin embargo, existe una oportunidad clara de fortalecer las competencias en tecnologías emergentes, que son cada vez más relevantes para la Industria 4.0.

En este sentido, la actualización curricular debería enfocarse en complementar las habilidades consolidadas con experiencias prácticas en estas tecnologías, con el fin de preparar a los ingenieros industriales para los desafíos futuros del entorno profesional digitalizado.

## 5. REFERENCIAS.

Alles, M. (2019). *Desarrollo del talento humano.* Buenos Aires: Granica.

Babica, M., Billeya, A., Nagerb, M., & Wuesta, T. (2022). Status Quo os Smart Manufacturing Curricula offered by ABET accredited Industrial Engineering programs in the US. *Manufacturing Letters*, 944-951.

Basco, A. I., Beliz, G., Coatz, D., & Garnero, P. (2018). *Industria 4.0: Fabricando el Futuro.* Argentina: Banco Interamericano de Desarrollo.

Gómez, M. C., Cocci Olea, N. N., Deschutter, N. E., & Jara, F. M. (2024). El perfil del ingeniero industrial en la era digital: un análisis de las competencias necesarias para desarrollarse dentro de la industria 4.0. *Congreso Internacional de Ingeniería Industrial.* La Plata. Buenos Aires: UTN FRLP.

Gómez, M. C., Deschutter, N. E., Cocci Olea, N. N., & Jara, F. M. (2024). Competencias en la industria 4.0: la formación del nuevo Ingeniero Industrial. *XXII Semana de Ingeneiría Industrial, de Producción y Mecánica Sudamericana.* Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.

Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativas, cualitativas y mixtas.* McGraw-Hill.

Nieponice, G., Rivera, R., Tfeli, A., & Drewanz. (2018). Acelerando el desarrollo de la Industria 4.0 en Argentina. *The Boston Consulting Group*.

Rojas-Arenas, I., Jiménez-Medina, E., & Yepes-Callejas, R. (2021). Competencias profesionales e Industria 4.0: análisis exploratorio para ingeniería industrial y administrativa en Medellin. *Revista Interamericana de Investigación, educación y Pedagogía*, V14, n.2.

Sackey, S., & Bester, A. (2016). Industrial Engineering Curriculum in Industry 4.0 in a South African Context. *South African Journal of Industrial Engineering*, 101-114.

# COMPETENCIAS EMOCIONALES EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL. DEL AULA AL MUNDO LABORAL

D´Onofrio, María Victoria; Morcela, Antonio

*Facultado de Ingeniería. Universidad Nacional de Mar del Plata*

vickyfi@fi.mdp.edu.ar; omorcela@fi.mdp.edu.ar

## 1. INTRODUCCIÓN.

En el mercado laboral actual se requiere que los profesionales de la Ingeniería Industrial no solo cuenten con conocimientos técnicos, sino también con habilidades emocionales. La capacidad para trabajar en equipo, comunicarse de forma efectiva tanto de manera oral como escrita, liderar y adaptarse a los cambios, así como el aprendizaje autónomo, son aspectos clave en cualquier puesto de trabajo. No obstante, las competencias relacionadas con la inteligencia emocional se han vuelto esenciales en el perfil de un Ingeniero Industrial. Estos profesionales colaborarán en equipo, gestionarán proyectos y diferentes áreas, y deberán mantenerse actualizados en tecnologías que pueden quedar obsoletas en poco tiempo, enfrentando la presión que cada una de estas tareas implica.

La competencia se entiende como un conocimiento complejo que se forma en un contexto educativo, integrando el "saber" conceptual, el "saber hacer" técnico y el "saber ser", que incluye relaciones interpersonales, emociones y valores. Dentro del "saber ser", es crucial fomentar la inteligencia emocional. Goleman (1999) destaca que esta habilidad es vital para la formación de profesionales, ya que los nuevos ingenieros y científicos deben ser competentes en este ámbito al ingresar al mercado laboral. La inteligencia emocional comienza con la autoconciencia y la conciencia social, lo que implica reconocer emociones y su impacto en el entorno (Andrade Vega, 2021).

Goleman (2000) define la inteligencia emocional como la capacidad de gestionar nuestras emociones y las de los demás, automotivarnos y manejar frustraciones. Identifica seis competencias emocionales: autoconsciencia, autoconfianza, empatía, autocontrol, motivación y competencias sociales, que se resumen en la Tabla 1.

La gestión de las emociones es clave para liderar equipos con éxito. Quienes la dominan son más efectivos en persuasión y motivación, comprenden mejor a sus compañeros y saben resolver problemas. Según Jácome Ortega y Lapo Maza (2015), la inteligencia emocional es fundamental en el ámbito organizacional y contribuye al desarrollo de líderes eficaces.

En las carreras de ingeniería, aunque las competencias emocionales no están explícitamente definidas en los ejes de desarrollo del Ministerio de Educación (Res. 1543/2021) ni en los del CONFEDI (2019), se pueden inferir al considerar aspectos como el trabajo en equipo, la comunicación efectiva y la actitud emprendedora, que están relacionados con las competencias emocionales mencionadas en la Tabla 1.

*Tabla 1 Dimensiones de las competencias emocionales de la inteligencia emocional.*

*Elaboración propia en base a Goleman (2000)*

| | Dimensiones | Características |
|---|---|---|
| **INTELIGENCIA EMOCIONAL** | AUTOCONSCIENCIA | Reconocer las emociones propias y sus efectos.<br>Conocer los valores propios, fortalezas y debilidades. |
| | AUTOCONFIANZA | Valorar las capacidades propias. |
| | EMPATÍA | Comprender a los demás, captar sus sentimientos y puntos de vista.<br>Interesarse activamente por las cosas que les preocupa. |
| | AUTOCONTROL | Gestionar las emociones y los impulsos conflictivos.<br>Asumir la responsabilidad de la propia actuación personal. |

| | | |
|---|---|---|
| | MOTIVACIÓN | Iniciar, guiar y mantener las conductas orientadas a lograr un objetivo o satisfacer una necesidad.<br>Tomar conciencia de la importancia que tiene cumplir con el desarrollo de una actividad. |
| | COMPETENCIAS SOCIALES | Brindar respuestas adecuadas a las demandas sociales del contexto.<br>Fomentar compromiso, proactividad, cooperación y esfuerzo. |

Ante la carencia observada, en la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de Mar del Plata, se han incorporado los contenidos pertinentes para completar la formación del estudiante, mejorando su competencia emocional y desarrollando habilidades sociales que le proporcionarán una mejor actuación profesional, en el marco de la formación complementaria.

Es por ello que se llevaron a cabo dos estrategias: la primera fue incluir una asignatura electiva para estudiantes de 5ºaño, denominada “Coaching Organizacional”, que aborda aspectos como la motivación, la autodeterminación, la superación, el entusiasmo y la capacidad de entrega. La otra consiste en adelantar contenidos básicos de competencias emocionales en el “Taller de Introducción a la Vida Universitaria” (TIVU), que se dicta en el 2º año de la carrera, que forma parte de un taller transversal anual denominado “Proyecto de Ingeniería Industrial I”.

Se solicitó a los estudiantes que cursaron el TIVU y la electiva que, de forma individual, desarrollaran un texto autobiográfico sobre un tema de reflexión común. Frederic Hudson (1991) destaca la importancia de la exploración personal y la narrativa de vida como unapráctica fundamental para comprender el propio camino. Utiliza el ejercicio de la autobiografía para asistir a las personas en la identificación de patrones que influyen en sus decisiones y comportamientos actuales. También les permite comprender cómo los eventos y las relaciones personales del pasado han moldeado sus valores y creencias, cómo consecuencia de utilizar dicho conocimiento para tomar decisiones más conscientes y efectivas sobre el futuro. Además Goleman (2000) basa su marco teórico en la idea de que la inteligencia emocional no es innata, sino que se aprende y se desarrolla a través de nuestras interacciones y experiencias vitales. Distingue que las personas que se eligen destacar en la autobiografía son precisamente los agentes de ese desarrollo. La forma en que se describe el vínculo aporta la capacidad del individuo para construir relaciones de confianza, apoyo o incluso aquellas que lo desafían, son indicadores de sus habilidades sociales.

A partir de la decodificación de las respuestas narrativas de los estudiantes, se clasificaron los resultados según las dimensiones de las competencias emocionales propuestas por Daniel Goleman (2000). Posteriormente, se compararon los hallazgos y se redactaron las conclusiones, las cuales están respaldadas por la bibliografía de autores relevantes en el campo de estudio.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS.

### 2.1 Participantes.

La muestra en estudio es no probabilística de tipo intencional, conformada por estudiantes de la carrera Ingeniería Industrial. 60del TIVU y 70 de la asignatura Coaching Organizacional, de 2º y 5º año respectivamente, entre los ciclos lectivos 2021 y 2024.

### 2.2. Instrumento de evaluación.

El instrumento aplicado es un texto autobiográfico que deben desarrollar los estudiantes, bajo la siguiente consigna: *“Intenta hacer un relato exhaustivo, destacando los hechos y las personas que en tu opinión han contribuido a hacer de vos la persona que sos hoy (aproximadamente 500 palabras)”*.

Ha sido seleccionado entre los ejercicios de auto reflexión propuestos por Hudson (1991), en los que destaca a la autobiografía como una herramienta clave.

### 2.3 Metodología.

El tipo de estudio realizado es cualitativo con apoyo de técnicas mixtas, partiendo de una perspectiva cualitativa interpretativa, centrada en los significados expresados por los estudiantes en sus relatos. Se integraron técnicas de análisis de contenido automatizado (frecuencia de palabras clave) para identificar patrones en los textos.Según Hernández Sampieri (2014), los estudios cualitativos se centran en la interpretación de significados, experiencias y emociones, sin pretender una generalización estadística.

El diseño metodológico es no experimental, transversal, exploratorio-comparativo. No experimental porque no se manipulan variables, se observa lo que los participantes hayan expresado. Se lo considera transversal porque el análisis se realiza en un único momento temporal (datos ya recolectados). Es exploratorio-comparativo ya que se buscó explorar diferencias entre dos grupos naturales (2º y 5º año) sin intervención externa.

Los datos provienen de respuestas escritas por estudiantes a una consigna reflexiva del tipo autobiográfico. Las respuestas fueron cargadas en formato Excel y procesadas posteriormente.

Se empleó un análisis de contenido categorial apoyado en herramientas de procesamiento de lenguaje natural:

- Codificación temática: a partir del marco conceptual de Goleman (2000), se definieron seis categorías de competencias emocionales: autoconsciencia, autoconfianza, empatía, autocontrol, motivación y competencias sociales.

- Palabras clave: se diseñó un set *ad hoc* (ver Tabla 2) para cada competencia y se aplicó conteo automatizado con técnicas de minería de texto (CountVectorizer).

- Análisis comparativo: se comparó la frecuencia relativa de aparición de las categorías en ambos grupos, lo que permitió observar diferencias por cohorte.

*Tabla 2 Set de palabras clave desarrollado ad hoc para el análisis textual.*

*Elaboración propia en base a Goleman (2000).*

| Competencia | Palabras clave |
|---|---|
| AUTOCONSCIENCIA | ['emociones', 'sentimientos', 'reflexión', 'autoconocimiento', 'reconocer', 'conocerme', 'ser consciente', 'interior', 'personalidad'] |
| AUTOCONFIANZA | ['logros', 'capaz', 'confianza', 'potencial', 'superar', 'valgo', 'seguridad', 'me esfuerzo', 'orgullo', 'autosuficiencia'] |
| EMPATÍA | ['escuchar', 'comprender', 'ayudar', 'sentir', 'emociones de otros', 'ponerme en el lugar', 'entender a otros', 'sensibilidad', 'cuidar', 'solidaridad'] |
| AUTOCONTROL | ['control', 'gestionar', 'paciencia', 'impulsos', 'tolerancia', 'resistir', 'mantener la calma', 'contenerme', 'equilibrio', 'serenidad'] |
| MOTIVACIÓN | ['objetivos', 'metas', 'superación', 'motivación', 'determinación', 'lograr', 'perseverancia', 'entusiasmo', 'ganas', 'mejorar'] |
| COMPETENCIAS SOCIALES | ['trabajo en equipo', 'comunicación', 'relaciones', 'liderar', 'grupo', 'interacción', 'colaborar', 'cooperación', 'compañeros', 'diálogo'] |

La selección de palabras clave utilizada para identificar competencias emocionales en los textos de estudiantes se fundamenta en el modelo de inteligencia emocional de Goleman (2000). Cada una de las competencias fue operacionalizada mediante un conjunto de términos asociados a sus dimensiones conceptuales, adaptados al lenguaje habitual en producciones escritas de estudiantes universitarios. La construcción del set se basó en criterios de proximidad semántica, incluyendo sinónimos, derivados gramaticales y expresiones coloquiales relevantes (Bardin, 2011).

Además, se tuvo en cuenta el enfoque metodológico propuesto por Hernández Sampieri et al (2014) para investigaciones cualitativas basadas en codificación categorial, así como los aportes de Salovey y Mayer (1990) como antecedente directo del enfoque de Goleman.

En conjunto, esta estrategia asegura una articulación coherente entre el marco teórico, el registro lingüístico empírico y las prácticas de análisis cualitativo en estudios de competencias emocionales.

La misma técnica de procesamiento de datos se aplicó al análisis de segmentación temática y de profundidad reflexiva.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

El set de palabras de referencia se utilizó para realizar un conteo automatizado de frecuencias mediante búsqueda por coincidencia textual directa. El corpus textual fue conformado por las respuestas abiertas de estudiantes de 2º y 5º añode Ingeniería Industrial a una consigna reflexiva común.

A través de este proceso, se identificaron las ocurrencias de palabras clave asociadas a cada competencia emocional, permitiendo así su cuantificación por cohorte y la posterior comparación entre grupos. Adicionalmente, se realizó una revisión manual de los textos con el objetivo de incorporar fragmentos que, si bien no incluían coincidencias literales con el set, expresaban claramente el contenido emocional vinculado a las competencias en estudio. Esta doble estrategia —automatizada y manual contextual— permitió una interpretación más completa y rigurosa de los relatos.

Para validar el análisis, se extrajeron además ejemplos textuales representativos que ilustran la presencia contextual o explícita de cada competencia, y se presentan a continuación.

### Autoconsciencia

1. *“Aunque la historia es complicada trato de no repetir patrones y seguir mi propio camino. Me gusta mucho la frase 'Lo importante no es lo que han hecho de nosotros, sino lo que hacemos nosotros con lo que han hecho de nosotros' y trato de guiarme por la misma.” (**contexto válido, aunque no haya coincidencia literal**)*
2. *“En mis momentos de **reflexión**, me di cuenta de que muchas decisiones que tomé en mi adolescencia estaban motivadas por el deseo de agradar, no por lo que realmente sentía.”*
3. *“Cuando comencé a estudiar ingeniería, fue más por cumplir expectativas ajenas que por un verdadero **autoconocimiento**. Hoy elijo desde otro lugar.”*

### Autoconfianza

1. *“Gracias a mi formación y al apoyo de toda mi familia, mi plan a futuro es poder desarrollarme profesionalmente y salir al mundo con las habilidades y competencias que he ido adquiriendo a lo largo de los años.” (**contexto**)*
2. *“En el ámbito académico siempre tuve un buen desempeño, pero también siempre estuvo acompañado de mucha autoexigencia (...) aprendí que estar al día con todo y sacarme buenas notas no me alcanzaba para ser feliz.” (**contexto**)*
3. *“Mis padres me inculcaron valores como la honestidad y la **confianza** en uno mismo. Siempre me hicieron sentir que era **capaz** de lo que me propusiera.”*

### Empatía

1. *“De esas situaciones aprendí que no hay que dar por hecho a las personas que nos hacen bien, y ahora intento poner entre mis prioridades **cuidar** esos vínculos.”*
2. *“Con mis amigas nos construimos y deconstruimos día a día. Me enseñaron sobre el feminismo y la **empatía** por el otro.”*

3. *“Mi abuela siempre ayudaba a todo el mundo en el barrio. De ella aprendí a **ayudar** sin esperar nada a cambio.”*

**Autocontrol**

1. *“Trabajo en **control** de mis emociones. Aprendí a frenar y pensar antes de actuar, especialmente en momentos de estrés académico.”*
2. *“Me enseñaron lo que es el aguante, la **paciencia**, el respeto, la ayuda y solidaridad.”*
3. *“En terapia vengo trabajando mi necesidad de **control** y de aceptación. No siempre puedo, pero ahora lo reconozco.”*

**Motivación**

1. *“Mi hermano mayor también es uno de mis ejemplos a seguir (...). Uno de mis **objetivos** de vida es poder recorrer el mundo como él lo está haciendo ahora.”*
2. *“Mis **metas** en un futuro cercano son poder trabajar de lo que estoy estudiando actualmente. Ansío vivir la experiencia y ver aplicados los conceptos que adquirí.”*
3. *“Él es el ejemplo de **superación** personal que más me ha marcado y es lo que aspiro a ser.”*

**Competencias sociales**

1. *“Hice muchos amigos a lo largo de mi vida, tanto de ámbitos escolares como deportivos. Hoy en día tengo un **grupo** muy unido.”*
2. *“Con mis amigas llevamos 9 años de amistad. Ellas son mi apoyo, nos construimos y deconstruimos día a día.” (**contexto**)*
3. *“Siempre priorizo el **diálogo** en cualquier tipo de relación, me parece la base para todo vínculo sano.”*

El análisis automatizado de frecuencias se basó en técnicas básicas de minería de texto y procesamiento de lenguaje natural (PLN), específicamente a través de una implementación funcional del método CountVectorizer, comúnmente utilizado en entornos como Python (*scikit-learn*). Este procedimiento permite transformar un corpus de textos en una matriz de términos que representa la frecuencia de aparición de palabras específicas dentro de cada documento.

Se aplicó una búsqueda por coincidencia literal (*string matching*) basada en el set de referencia. Este enfoque tiene la ventaja de ser reproducible, rápido y eficiente, aunque presenta limitaciones como la dependencia de las formas exactas de las palabras (no incluye lematización ni análisis semántico profundo). Para compensar esta limitación, se complementó el análisis automatizado con una revisión manual cualitativa, que permitió identificar casos de expresiones equivalentes o parafraseadas que no coincidían textualmente pero sí conceptualmente.

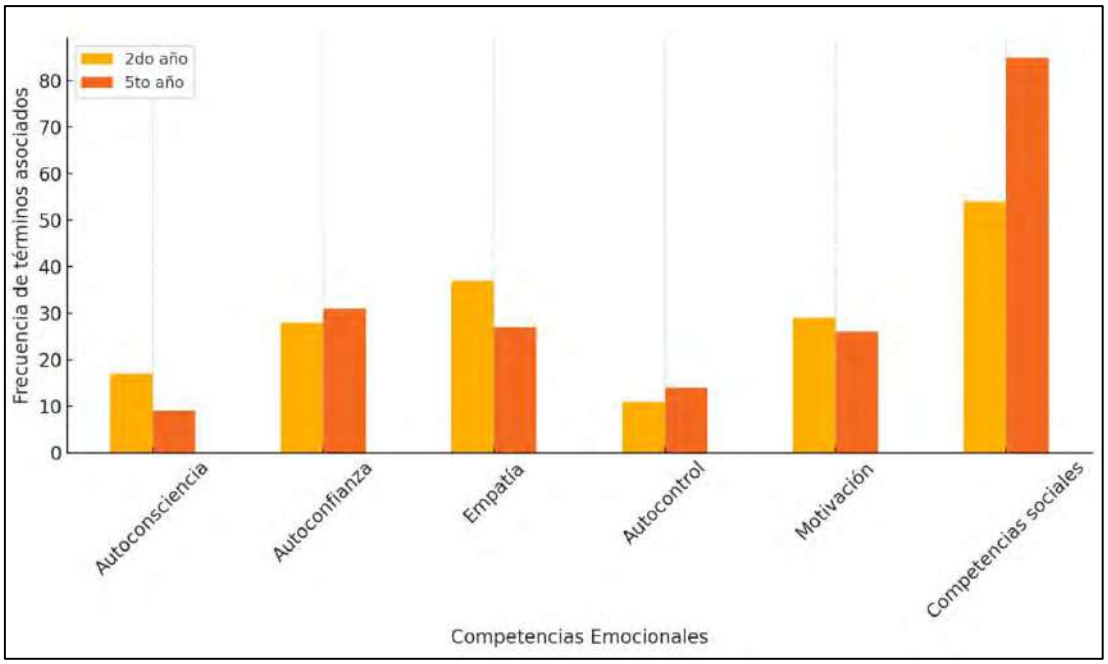



*Figura 1 Comparación de Competencias Emocionales entre 2º y 5º año.*

En la Figura 1 se presentan los resultados obtenidos a través de un gráfico comparativo de competencias emocionales entre 2º y 5º año.

En los resultados se observa que frases relacionadas con la empatía y la motivación aparecen con mayor frecuencia en las narrativas de 2º año, lo cual puede reflejar un enfoque más relacional y aspiracional en esta etapa formativa.

Las referencias a la autoconsciencia están más presentes en 2º año, lo que podría relacionarse con una mayor introspección al inicio del trayecto universitario.

Las referencias relativas a la autoconfianza y el autocontrol son más frecuentes en 5º año, lo que sugiere un desarrollo progresivo de la autorregulación y seguridad personal hacia el final de la carrera.

La diferencia en las competencias emocionales entre 2º y 5º año se podría explicar desde el rol estudiantil y la transición al mundo profesional.

En los resultados se observa que frases relacionadas con la empatía y la motivación aparecen con mayor frecuencia en las narrativas de 2º año, lo cual puede reflejar un enfoque más relacional y aspiracional en esta etapa formativa.

Lasreferencias a la autoconsciencia están más presentes en 2º año, lo que podría relacionarse con una mayor introspección al inicio del trayecto universitario.

Las referencias relativas a laautoconfianza y el autocontrol son más frecuentes en 5º año, lo que sugiere un desarrollo progresivo de la autorregulación y seguridad personal hacia el final de la carrera.

La diferencia en las competencias emocionales entre 2º y 5º año se podría explicar desde el rol estudiantil y la transición al mundo profesional.

Las observaciones anteriores se pueden sustentar en el siguiente análisis, y las consideraciones de diferentes autores que abordan la narrativa y las competencias emocionales:

1. Los estudiantes de 2º año presentaron más referencias a la empatía y a la motivación. Esto puede atribuirse al entusiasmo inicial de estar comenzando la carrera. Muchos estudiantes se expresan con ilusión sobre sus sueños, el apoyo de su entorno, y su deseo de superación. Se posicionan desde un rol aún aspiracional (“quiero ser”, “me esfuerzo por”), lo cual motiva una narrativa centrada en metas, ideales y vínculos significativos. Esto se relaciona con el rol identitario en construcción.

2. Los estudiantes de 5º año expresan más términos vinculados a la autoconfianza y autocontrol, lo que puede reflejar la consolidación personal y académica porque ya han atravesado desafíos que

requieren organización, manejo del estrés y seguridad en sus capacidades.Además, presentan narrativas de resiliencia: relatan trayectorias superadas, y suelen ubicarse desde un lugar de “haber aprendido a manejarse”.

3. Un hallazgo relevante es que la empatía y la motivación decrecen al final de la carrera. Algunas posibles causas se pueden atribuir a la tensión e incertidumbre laboral, la proximidad al egreso puede activar preocupaciones sobre empleabilidad, exigencias del entorno profesional y comparación con expectativas. También se presenta un cambio de foco narrativo ya que,en lugar de hablar de sueños, los textos se orientan a cómo mantenerse firmes, cumplir metas y sostenerse emocionalmente, lo que desplaza la motivación al plano práctico.

Estas diferencias narrativas también pueden reflejar un cambio de paradigma emocional: de una emocionalidad expansiva y relacional en 2º año, a una emocionalidad contenida y de resistencia en 5º año. Un estudio que utilizó el “Malaysian EQ Inventory Test (MEQI)” encontró que, aunque el coeficiente emocional total tiende a estabilizarse e incluso a disminuir ligeramente hacia el final de la carrera, ciertas áreas como las habilidades sociales mostraron un aumento significativo en estudiantes avanzados(Saibani et al., 2015).

Específicamente, Saibani et al. (2015) documentaron que los estudiantes de ingeniería presentan mejoras claras en autocontrol, autoconfianza y competencias sociales hacia el 5º año de sus carreras, lo que concuerda con el análisis de mayor frecuencia de referencias relacionadas con dichas habilidades en el grupo de 5º año.

Por otro lado, los mismos autores reportaron una leve disminución en los niveles de empatía y autoconsciencia hacia el final de la carrera (Saibani et al., 2012), lo cual refuerza la hipótesis de que estos atributos emocionales podrían verse desplazados conforme los estudiantes adoptan un rol más profesional.

En un plano más amplio, Roberts y Mroczek (2008) han concluido que la adultez joven (20–40 años) está marcada por un aumento de rasgos como autoconfianza, estabilidad emocional, autocontrol y cordialidad, explicando en parte las diferencias observadas entre las cohortes (al inicio y al final de la carrera).

### 3.1Análisis de segmentación temática.

Para identificar los principales tópicos abordados por los estudiantes en sus relatos, se aplicó una estrategia de segmentación temática basada en análisis de contenido y minería de texto. Se construyó un diccionario de categorías temáticas relevantes para el contexto estudiado (como familia, estudio, trabajo, vínculos, migración y salud mental), cada una definida por un conjunto de palabras clave representativas. Siguiendo la misma estrategia de análisis textual se pudo identificar patrones narrativos y focos de sentido predominantes en los discursos estudiantiles (ver Tabla 3).

*Tabla 3 Frecuencia de aparición temática el análisis textual.*

*Elaboración propia.*

| Temas | 2do Año | 5to Año | Variación |
|---|---|---|---|
| Estudio | 86 | 80 | - 7% |
| Familia | 100 | 98 | - 2% |
| Migración | 10 | 18 | + 80% |
| Salud mental | 13 | 24 | + 85% |
| Trabajo | 44 | 51 | + 16% |
| Vínculos | 83 | 89 | + 7% |

Los relatos de los estudiantes fueron clasificados temáticamente en función de la presencia de términos asociados a categorías relevantes para su trayectoria personal y académica. En el caso del tema familia, se consideraron referencias a vínculos familiares directos, incluyendo términos como (mamá, papá, familia, hermano, hermana, padres, hijo, sobrina, abuelo, abuela). Para el tema estudio, se incluyeron palabras relacionadas con el contexto educativo universitario, tales como (universidad, facultad, estudiar, materia, carrera, ingeniería, estudiante, docente, examen, notas).

La categoría trabajo agrupó menciones a la experiencia laboral presente o futura, con términos como (trabajo, empleo, oficio, empresa, laburar, laboral, jefe, puesto, sueldo). El tema vínculos se basó en

expresiones sobre relaciones interpersonales significativas, como (amigo, amiga, pareja, novia, novio, relación, vínculo, amistad). En cuanto a migración, se codificaron relatos que hacían alusión a cambios de lugar de residencia, mudanzas o experiencias culturales en otros territorios, mediante palabras como (mudé, trasladé, viajé, emigré, otro país, extranjero, cultura).

Finalmente, la categoría salud mental fue identificada a partir de términos que expresaban malestar emocional o búsqueda de apoyo psicológico, como (ansiedad, estrés, terapia, psicólogo, depresión, emocional, angustia, salud mental).

El análisis de segmentación temática muestra que, aunque hay una alta frecuencia de temas como familia y estudio en ambas cohortes, existen diferencias significativas en otros focos narrativos que refuerzan la hipótesis de un cambio de prioridades y preocupaciones a lo largo del trayecto universitario.

- En 2º año, el tema *estudio* es ligeramente más frecuente que en 5º año (−7%). Este dato refuerza la idea de que los estudiantes que recién comienzan la carrera están más centrados en su rol académico y en la etapa de adaptación al entorno universitario. Esto coincide con la alta presencia de competencias como motivación y empatía, asociadas a metas aspiracionales y vínculos de apoyo.
- En 5º año, aumenta la frecuencia de referencias a trabajo (+16%), salud mental (+85%) y migración (+80%). Estos temas sugieren una mayor preocupación por la transición hacia el mundo laboral, el manejo del estrés asociado al egreso y el proyecto de vida fuera del entorno académico inmediato. Estas narrativas se articulan con las competencias de autocontrol y autoconfianza, que también fueron más mencionadas en este grupo.
- La mención creciente a salud mental en 5º año puede interpretarse como un indicador del desgaste emocional acumulado, la presión por egresar o la ansiedad frente a la incertidumbre profesional. Esta tendencia complementa el hallazgo de una menor frecuencia de competencias relacionales como empatía, lo que puede leerse como un desplazamiento hacia una emocionalidad más introspectiva y funcional.
- El aumento en referencias a migración también puede reflejar que estudiantes próximos al egreso comienzan a proyectarse profesionalmente más allá de su entorno inmediato, o bien que relatan experiencias pasadas relevantes para su trayectoria de formación.

### 3.2 Análisis de la profundidad reflexiva.

Para evaluar la profundidad reflexiva en los relatos, se aplicó una estrategia de análisis de contenido basada en la detección de unidades de significado asociadas a cuatro niveles narrativos: autodescripción, evaluación personal, cambio o transformación y proyección (Brockbank & McGill, 2007). Nuevamente se construyó un set de expresiones clave para cada categoría y se utilizó un modelo automatizado de búsqueda de coincidencias literales en los textos. Esta codificación permitió identificar cuántas y cuáles de estas dimensiones estaban presentes en cada relato. Posteriormente, se cuantificó la frecuencia de aparición por cohorte (2º y 5º año) y se analizó su variación porcentual, permitiendo interpretar los patrones de elaboración del yo en función del momento formativo de los estudiantes.

La consigna original que se dio a los encuestados fue *"Intenta hacer un relato exhaustivo, destacando los hechos y las personas que en tu opinión han contribuido a hacer de vos la persona que sos hoy".*Este contexto es clave para reinterpretar las observaciones sobre la profundidad reflexiva, ya que la consigna promueve autorrelato, valoración subjetiva, memoria emocional y proyección identitaria.

Considerando la consigna que convocaba a construir un relato personal exhaustivo sobre los hechos y personas significativas en la formación del yo, el análisis de profundidad reflexiva revela que los estudiantes respondieron en general con un alto nivel de implicación narrativa. Predomina la autodescripción, con frecuentes expresiones de identidad, personalidad y autodefinición, lo cual está directamente alineado con el núcleo de la consigna.

También es elevada la presencia de evaluación personal, donde los estudiantes reflexionan sobre aprendizajes y reconocimientos en su trayectoria, especialmente aquellos relacionados con vínculos afectivos y experiencias formativas. La proyección aparece como un recurso habitual en estudiantes de 2º año, quienes utilizan el relato para expresar aspiraciones futuras, en coherencia con su posicionamiento inicial en la carrera.

Por otro lado, la categoría de cambio o transformación se encuentra casi exclusivamente en los relatos de 5º año, lo que refleja una construcción más elaborada del yo a partir de la experiencia. Esto sugiere que los estudiantes próximos a egresar no solo relatan hechos, sino que los integran en una narrativa de desarrollo personal, tal como lo proponía la consigna.

En conjunto, los niveles de profundidad detectados muestran una apropiación del ejercicio reflexivo, diferenciada por etapa de la carrera, pero coherente con la invitación a contar "cómo llegaron a ser quienes son hoy".

## 4. CONCLUSIONES.

El análisis de las autobiografías evidencia un proceso dinámico en la configuración de las competencias emocionales a lo largo del trayecto universitario, fuertemente influenciado por el momento formativo de cada cohorte. La comparación entre los relatos de estudiantes de 2º y 5º año muestra un desplazamiento desde una emocionalidad aspiracional y relacional hacia una emocionalidad más autorregulada y orientada a la adaptación profesional.

En los estudiantes de 2º año, las competencias de empatía, motivación y autoconsciencia son las más mencionadas, reflejando una construcción identitaria en expansión, sostenida por vínculos significativos, entusiasmo vocacional y proyección futura. Esta emocionalidad se alinea con los temas más frecuentemente abordados en sus narrativas, como estudio, familia y vínculos personales, lo cual refuerza la centralidad del entorno afectivo y académico en esta etapa. Asimismo, el análisis de profundidad reflexiva revela un predominio de las categorías de proyección y evaluación personal, enmarcando al relato como una herramienta para imaginar y construir el yo futuro.

Por otro lado, en los estudiantes de 5º año emergen con mayor fuerza las competencias de autoconfianza y autocontrol, indicando una mayor consolidación emocional frente a los desafíos del egreso. La narrativa se reconfigura en torno a temas como trabajo, salud mental y migración, lo que sugiere que las preocupaciones por la inserción laboral, la gestión del estrés y la estabilidad personal cobran protagonismo. La autobiografía en este grupo se orienta más hacia la transformación y la resiliencia, evidenciada por una mayor frecuencia de expresiones de cambio en los relatos. El yo narrado se construye retrospectivamente, integrando obstáculos superados, aprendizajes emocionales y estrategias de afrontamiento.

Esta evolución narrativa no implica una pérdida de competencias relacionales, sino un reajuste del foco emocional: desde el idealismo expansivo de los comienzos hacia una emocionalidad más contenida y estratégica. En lugar de relatar sueños por alcanzar, los estudiantes avanzados narran cómo han aprendido a sostenerse, regularse y adaptarse en contextos de mayor exigencia. La autobiografía, en este sentido, se convierte en una ventana privilegiada para observar cómo los estudiantes procesan internamente los cambios de rol, las tensiones del sistema universitario y las expectativas del mercado laboral.

## 5. REFERENCIAS.


Andrade Vega, K. (2021). *La inteligencia emocional en el desarrollo de la competencia de liderazgo en la empresa familiar soluciones empresariales HTS* [Especialista en Gerencia del Talento Humano, Fundación Universidad de América, Colombia]. Repositorio Institucional - Universidad de América.https://doi.org/10.33414/ajea.1365.2024

Bardin, L. (2011). *Análisis de contenido*. Ediciones Akal. https://books.google.com.co/books?id=IvhoTqll_EQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

Brockbank, A., & McGill, I. (2007). *Facilitating reflective learning in higher education* (2nd ed.). Editorial Routledge.

CONFEDI (2019). *Propuesta de normativa para la regulación de las Carreras de Ingeniería*. Consejo Federal de Decanos de Ingeniería.

Goleman, D. (1999). *La práctica de la Inteligencia Emocional*. Editorial Kairós.

Goleman, D. (2000). *La Inteligencia Emocional.* Editorial Vergara.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (6ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.

Hudson, F. M. (1991). *Mastering the Art of Self-Renewal Mastering the Art of Self-Renewal*. Editorial Jossey-Bass.

Jácome Ortega, J. & Lapo Maza, M. C. (2015). Inteligencia emocional y liderazgo. https://www.researchgate.net/publication/305490074_INTELIGENCIA_EMOCIONAL_Y_LIDERAZGO

Ministerio de Educación de la Nación Argentina (2021). *Resolución 1543/2021.*

Roberts, B. W., & Mroczek, D. (2008). Personality trait change in adulthood. Current Directions in Psychological Science, 17(1), 31-35. https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2008.00543.x

Saibani, N., Sabtu, M. I., Muhamad, N., Wahab, D. A., Sahari, J., & Deros, B. M. (2012). Comparison of emotional intelligence scores among engineering students at different stages of an academic program. Asian Social Science, 8(16), 88. https://dx.doi.org/10.5539/ass.v8n16p88

Saibani, N., Sabtu, M. I., Harun, Z., Mahmood, W. M. F. W., Muhamad, N. I., Wahab, D. A., & Sahari, J. (2015). Comparison of emotional intelligence scores among engineering students of an academic programme. *Journal of Engineering Science and Technology, Special Issue on UKM Teaching and Learning Congress 2013*, *10*, 41-51.

Salovey, P., & Mayer, J. D. (1990). *Emotional intelligence*. *Imagination, Cognition and Personality, 9*(3), 185–211. https://doi.org/10.2190/DUGG-P24E-52WK-6CDG

# BRECHAS DE VISIBILIDAD Y RECONOCIMIENTO EN INGENIERÍA, DE LAS MUJERES

Ruiz Morales, María Valentina; Flórez Rodríguez, Daniela Janeth

*Facultad de ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada*
*est.mariav.ruiz@unimilitar.edu.co*
*est.danielaj.florez@unimilitar.edu.co*

**RESUMEN**

Este artículo presenta una revisión sistemática de estudios académicos con el objetivo de analizar las brechas de visibilidad y reconocimiento de las mujeres en ingeniería, con énfasis en tres problemáticas centradas en la falta de referentes femeninos que limitan el interés de niñas en STEM, el entorno educativo inicial que limita el interés femenino en STEM y los estereotipos de género persistentes. Los estudios revisados utilizaron metodologías cualitativas, cuantitativas y mixtas. Para recolectar y analizar la información, aplicaron herramientas como encuestas, análisis de publicaciones, estudios de caso, talleres y líneas cronológicas. Las fuentes vienen de revistas académicas, tesis de maestría y experiencias de universidades en países como Irlanda, Colombia, Argentina, España, Ecuador, Kosovo, entre otros. Los resultados evidencian una baja representación femenina en cargos de liderazgo, menor citación de sus investigaciones y una invisibilización de sus aportes científicos. Además, se identifican barreras de género que limitan el acceso a un buen reconocimiento académico. Se concluye que estas brechas afectan el crecimiento y permanencia profesional de las mujeres ingenieras y limitan la diversidad en la ciencia. Por eso, se recomienda hacer más investigaciones con enfoque regional e interseccional para ayudar a cerrar estas desigualdades persistentes.

**Palabras Claves:** *Mujeres, ingeniería, género, visibilidad, liderazgo.*

**ABSTRACT**

This article presents a systematic review of academic studies with the aim of analyzing the visibility and recognition gaps of women in engineering, with emphasis on three issues centered on the lack of female referents that limit girls' interest in STEM, the initial educational environment that limits female interest in STEM, and persistent gender stereotypes. The studies reviewed used qualitative, quantitative and mixed methodologies. To collect and analyze the information, they applied tools such as surveys, publication analysis, case studies, workshops, and timelines. The sources come from academic journals, master's theses and experiences of universities in countries such as Ireland, Colombia, Argentina, Spain, Ecuador, Kosovo, among others. The results show a low representation of women in leadership positions, less citation of their research and a invisibilization of their scientific contributions. In addition, gender barriers are identified that limit access to good academic recognition. It is concluded that these gaps affect the professional growth and permanence of women engineers and limit diversity in science. Therefore, more research with a regional and intersectional approach is recommended to help close these persistent inequalities.

**Keywords:** Women, engineering, gender, visibility, leadership.

## 1. INTRODUCCIÓN

La ciencia estudia el mundo tal cual es, pero los ingenieros instauran el mundo que quieren que exista. Al unir estas dos áreas se forman profesionales capaces de formular soluciones eficientes, seguras y sostenibles que integren la ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas, dando paso al enfoque multidisciplinario STEM. Desde 1990, cuando la tendencia STEM comenzó a promoverse y expandirse por todo el mundo, la sociedad ha experimentado transformaciones profundas. En el corazón de estos cambios, esta comunidad no sólo ha sido motor clave del desarrollo económico y la innovación, sino que también se ha convertido en pilar fundamental para enfrentar los grandes desafíos globales. En este contexto, formar parte del ámbito STEM no es solo una opción profesional: es tener una función activa en la construcción del futuro. No obstante, la promoción de este rol continúa siendo desigual puesto que no se promueve de manera equitativa ni visible para todos los grupos.

La baja representación femenina en STEM constituye el problema de la brecha de género que se entiende y comunica mediante la subrepresentación de ellas en estos campos (Cortés Barros, V. 2021). Dicha brecha no sólo se limita a la accesibilidad de las mujeres a la formación académica en estas áreas, sino que también se extiende al reconocimiento, ascenso, liderazgo y visibilidad dentro de las disciplinas. Esta problemática de desigualdad hace que la ingeniería invisibilice referentes femeninos y detenga el interés por parte de nuevas aprendices que apenas comienzan en su camino académico, obstruyendo la diversidad y las futuras vocaciones profesionales como ingenieras.

Factores como estereotipos de género, faltas de referentes femeninos y limitaciones en el entorno educativo, contribuyen a que las mujeres se enfrenten a un camino más complejo, obstructivo e incierto. De esta manera, se identifican las percepciones sobre las competencias de las ingenieras, el papel de los hombres en la inclusión y las dinámicas excluyentes de los círculos masculinos (Costello, O. 2024). Diversos estudios confirman que la participación femenina en la ingeniería aplicada se ve afectada por barreras estructurales y culturales que afectan la percepción social y el reconocimiento profesional (Bula, et al. 2021). La escasa representación de las mujeres se puede ver reflejada en situaciones de pérdida que no solo perjudican a los lugares de trabajo específicos, sino a la ingeniería en su conjunto y a la sociedad en general al no aprovechar todo el talento disponible y reducir el potencial de innovación en donde siempre se valora más el pensamiento masculino, centrando el desarrollo y avance técnico entorno a una perspectiva mucho más limitada (Hersh, et al. 2023).

Hablar de brechas de género es impulsar el cambio y ampliar la perspectiva global de la ingeniería, abriendo así oportunidades, promoviendo la justicia social y ampliando el potencial de innovación en estos campos. Los profesionales tienen un papel y una responsabilidad muy importante en la configuración de la sociedad moderna. La diversidad entre los ingenieros es importante para cumplir esta responsabilidad y garantizar que se tengan en cuenta la creatividad y las necesidades de toda la población (Hersh, M. 2017). Cada mujer que se ve limitada para acceder, permanecer o liderar este campo, representa una inmovilización en el avance de la disciplina profesional tecnológica.

Bajo esta perspectiva, este trabajo busca una revisión sistemática de artículos que plantean la falta de visibilidad y reconocimiento de las mujeres en el ámbito de la ingeniería. A partir del análisis se identifican patrones recurrentes que evidencian y refuerzan esta problemática, con el fin de generar un abordaje integral que permita comprender sus causas y sintetizar las estrategias de mitigación propuestas por los autores. Así pues, la intención de este artículo es servir como un punto de referencia para aquellos que deseen profundizar del tema, facilitando el acceso y comprensión a la información existente. De este modo, generando la necesidad de construir un entorno más imparcial en la ingeniería.

Por consiguiente, este artículo se estructura en tres apartados que abordan factores clave relacionados con la participación femenina en STEM. En primer lugar, se analiza la baja representación de mujeres en estas disciplinas y sus implicaciones para el desarrollo del sector. En segundo lugar, se examina cómo la ausencia de referentes femeninos y las limitaciones presentes en el entorno educativo inicial influyen de manera directa en el interés y la motivación de las niñas hacia estas áreas del conocimiento.

Finalmente, se estudia la persistencia de estereotipos de género que continúan reproduciendo barreras culturales y sociales para su plena inclusión.

## 2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y RECOLECCIÓN DE DATOS

Realizar una revisión sistemática de literatura permite adentrarse en el campo de estudio y constituye una etapa inherente de la investigación. En este sentido, para desarrollar un trabajo académico significativo, resulta indispensable efectuar una revisión exhaustiva de las publicaciones existentes en el área. El artículo de revisión busca la identificación de lo que ya se conoce y, sustancialmente, lo que aún se desconoce en el ámbito de estudio, respondiendo a una serie de preguntas oportunamente planteadas y estructuradas (Guirao-Goris et al., 2008).

Esta sección describe el proceso seguido para llevar a cabo el análisis sistemático de la literatura sobre las brechas de género en la ingeniería. El propósito de esta investigación fue identificar patrones en común, lagunas o vacíos de conocimiento. Además de los hallazgos claves abordados previamente en las investigaciones encontradas sobre la participación de las mujeres en el campo ingenieril. Con el fin de comprender los factores causantes de dichos sesgos de género y los retos o estrategias que se han establecido para lograr una inclusión equitativa.

La metodología empleada para llevar a cabo el estudio relacionado con la brecha de género y la falta de reconocimiento de las mujeres en la ingeniería constó de una revisión sistemática de estudios previos sobre el tema. Seguidamente, se formularon las problemáticas esenciales y se establecieron criterios de inclusión y exclusión. Además, se diseñó la ecuación de búsqueda en las bases de datos Google Académico y ScienceDirect en donde se estipularon términos clave para seleccionar críticamente las fuentes de información. Finalmente, se extrajeron datos relevantes presentando resultados, análisis e interpretación de dichos hallazgos para la elaboración del informe final.

### 2.1. Identificar la necesidad de una revisión.

La revisión sistemática se planteó como respuesta a la persistente desigualdad de género en el ámbito de la ingeniería, evidenciada en los diferentes textos académicos. A pesar de los avances en la accesibilidad femenina a los procesos de educación superior, su participación y permanencia en las disciplinas STEM, particularmente en la ingeniería, sigue siendo limitada. Esta situación genera la necesidad de examinar críticamente las causas que inciden en esta distinción y como ha sido abordada en la literatura actual.

De igual manera, la carencia de referentes femeninos, bajo reconocimiento y subrepresentación en roles de liderazgo dentro del campo justifican la importancia de realizar un análisis que visibilice estos aspectos. Así, esta revisión no solo busca recopilar la información de estas investigaciones relevantes, sino también garantizar que los resultados obtenidos tengan un alto nivel de validez y fiabilidad. De este modo, aportando a la construcción de un panorama más completo y actualizado que contribuya a la formulación de soluciones, estrategias y avances ya planteados en la literatura científica.

### 2.2. Problemáticas investigación.

Para garantizar la obtención de resultados sólidos en el proceso de revisión sistemática, se instauraron tres problemas clave (PC) a identificar en los textos considerados. Así pues, al centrar el tema de estudio en las brechas de visibilidad y reconocimiento de las mujeres, surgieron las cuestiones investigativas esenciales relacionadas con la baja representación femenina en STEM:

- (PC1) La falta de referentes femeninos limita el interés de niñas en STEM.
- (PC2) El entorno educativo inicial limita el interés femenino en STEM.
- (PC3) Estereotipos de género persistentes

Estas tres problemáticas fueron seleccionadas por abordar dimensiones fundamentales para el desarrollo de resultados concluyentes. En particular, la falta de referentes femeninos destaca como una

problemática clave, ya que las generaciones presentes y futuras carecen de suficientes modelos femeninos visibles en el ámbito ingenieril. A través de este trabajo, se identifican textos que visibilicen logros y descubrimientos femeninos para incentivar la participación de más mujeres en esta disciplina (Johnsson, C. et al., 2023). Así mismo, al identificar que el entorno educativo inicial carece de incentivos e intereses prácticos para las niñas que se encuentran en edades tempranas de aprendizaje, con este trabajo se pretende encontrar ejemplares con programas de mentoría que demuestren estrategias eficaces para aumentar la participación de niñas en áreas STEM y generar cambios sustanciales en interés, confianza y percepción de pertenencia (Dick, T. et., al 2024). Finalmente, al determinar el problema de estereotipos de género persistentes, que a menudo disuaden a las mujeres de interesarse por la ingeniería y las demás áreas STEM, en los niveles de educación secundaria y terciaria (Jackson, R. et, al., 2021), se propone con este trabajo, exponer otros comentarios e investigaciones referentes que provean y demuestren la subrepresentación y creencia simplificada del actuar de las mujeres por su sexo.

Las problemáticas identificadas no solo están interconectadas entre sí, sino que se retroalimentan para dar paso a un ciclo que reproduce un ciclo de desigualdad en los campos de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM). La ausencia de modelos femeninos visibles en STEM intensifica las creencias estereotipadas sobre la “supuesta” menor capacidad de las mujeres para estas disciplinas, lo que a la vez influye en la orientación vocacional que reciben durante su formación tanto en ámbitos escolares como familiares. Un entorno educativo que no promueve una activa participación femenina termina no solo validando lo ya dicho, sino que a su vez se encarga de limitar las oportunidades de exploración y aprendizaje de las niñas desde una corta edad. En conjunto, cuando se conectan estos factores no sólo desincentiva la participación femenina en STEM, sino que básicamente afectan la trayectoria profesional de estas mujeres y que contribuyen a la “fuga” de talento femenino (Çelik & Watson, 2021).

A pesar de los avances en la participación de las mujeres en el área, el impacto de estas tres problemáticas generadas ya sea por factores culturales, estructurales y discriminatorios causan fenómenos conocidos como *leaky pipeline*. Esta metáfora, ampliamente reconocida en la literatura académica, describe básicamente cómo las mujeres van abandonando progresivamente su trayectoria académica y profesional en STEM en cada etapa del camino, desde la formación hasta el liderazgo que son una pérdida sistemática de talento provocada por barreras profundamente estructurales. (Abuwatfa, W. et. al, 2021). El impacto de estas problemáticas va más allá del ámbito individual: afectan la calidad del conocimiento, limitan la innovación con un enfoque inclusivo y perpetúan un modelo desigual para el desarrollo global.

### 2.3. Proceso de búsqueda.

La búsqueda de documentos se llevó a cabo en dos bases de datos: Google Académico y ScienceDirect. Estas plataformas fueron seleccionadas por su amplio alcance y acceso a literatura científica actualizada, así como por su diversidad de fuentes, que permiten abordar el tema desde diferentes enfoques disciplinarios. Para la selección de los estudios más pertinente, se utilizó la siguiente ecuación de búsqueda:

*Tabla 1 Ecuación de búsqueda.*

| Tópico | Términos buscados |
|---|---|
| Temática | (“gender gap”) |
| Campo disciplinar | (“engineering” OR “STEM”) |
| Enfoque específico | (“leadership” OR “visibility OR “participation” OR “representation”) |

*Nota. Fuente: "Metodologías de Enseñanza – Aprendizaje y su aplicación en las asignaturas de Ingeniería Industrial: una revisión sistemática" por N. Moreno, 2025, Universidad Militar Nueva Granada.*

Seguidamente se establecieron criterios específicos de inclusión y exclusión con el fin de determinar qué artículos serían considerados pertinentes para el análisis en esta revisión:

*Tabla 2 Criterios de Inclusión y Exclusión:*

| Criterio de Inclusión | Criterio de Exclusión |
|---|---|
| Publicaciones entre 2015 y 2025 | Publicaciones anteriores a 2025 |
| Escritas en inglés y español | Estuvieran en idiomas distintos al inglés y español |
| De acceso abierto | No contarán con acceso abierto |
| Indexadas en bases | No estuvieran indexadas |
| Relacionadas con la ingeniería | No tuvieran vínculo con STEM y la ingeniería |
| Que no fueran revisiones sistemáticas | Fueran revisiones de otras revisiones sistemática |

*Nota. Fuente: "Metodologías de Enseñanza – Aprendizaje y su aplicación en las asignaturas de Ingeniería Industrial: una revisión sistemática" por N. Moreno, 2025, Universidad Militar Nueva Granada.*

En la figura 1 presenta el diagrama PRISMA, una herramienta que permitió visualizar de manera estructurada el proceso de identificación, selección, evaluación e inclusión de los estudios analizados:

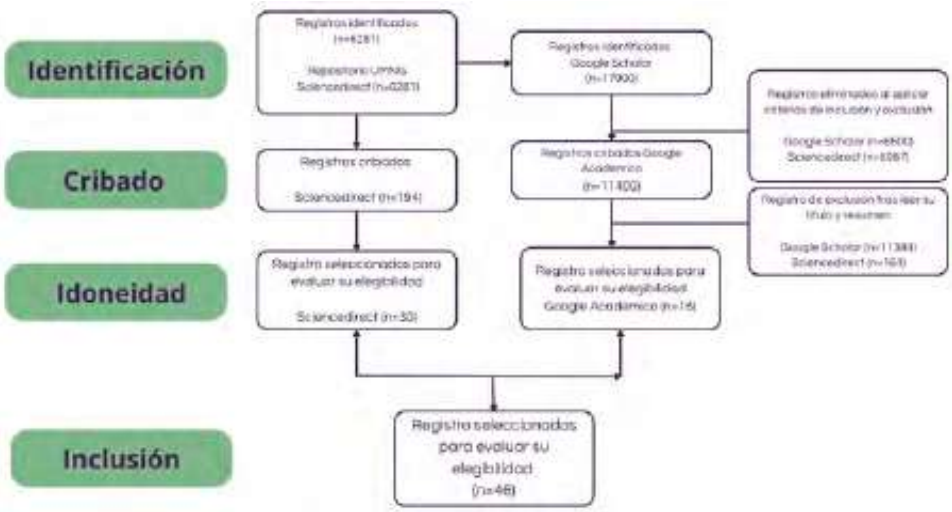



*Figura 1*

*Diagrama de flujo PRISMA del estudio*
*Nota. Fuente: Elaboración propia.*

Al iniciar, se tenían 24.181 documentos iniciales. Durante la fase de identificación de estos se descartaron 12.587 documentos por no cumplir los objetivos generales de la revisión o no estar

relacionados con la temática central del estudio. Posteriormente, en la etapa de cribado, se realizó una revisión detallada de los títulos, resúmenes y palabras claves de los documentos restantes. Como resultado de este proceso, se eliminaron 11.548 artículos por falta de relevancia temática. Finalmente, tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión previamente definidos, se seleccionaron 46 artículos que cumplían con los requisitos metodológicos y conceptuales establecidos. Estos estudios son los encargados de conformar el cuerpo del análisis para el desarrollo de la revisión sistemática.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 (PC1) La falta de referentes femeninos limita el interés de niñas en STEM.

A lo largo de la historia, las mujeres han realizado valiosos aportes y descubrimientos a la ingeniería y todas las áreas STEM; sin embargo, la visibilización de estos referentes femeninos ha sido escasa y, en muchas ocasiones, casi nula. Ejemplificando esta falta, se puede mencionar el hallazgo del artículo "Historical Female Influencers in Automatic Control" en donde la baja representación femenina quedó reflejada en cifras preocupantes, como por ejemplo que 11 de 128 tesis fueron escritas por mujeres en 60 años en Lund. A pesar del impacto de las mujeres, su reconocimiento ha sido mínimo en libros, textos, citaciones e incluso premios (Johnsson C et. al, 2023). Sumado a ello, la ausencia histórica y actual de referentes femeninos en ciencia, tecnología e ingeniería refuerza la desigualdad en el acceso a la formación y la investigación, alimentando fenómenos como el "laberinto de cristal". Esta infrarrepresentación no sólo limita la presencia de mujeres en titulaciones tecnológicas e ingenieriles, sino que también perpetúa sesgos de género inconscientes, especialmente en sectores y cargos directivos donde la visibilidad femenina es escasa o inexistente. (Calleja, H., & De las, A, 2023)

Para mitigar esta problemática, varios autores han propuesto soluciones que han demostrado el impacto positivo en la divulgación y reconocimiento femenino en la ingeniería. Un ejemplo claro es el "efecto Matilda" que denuncia la invisibilización histórica de los aportes de mujeres científicas, la cátedra busca fomentar vocaciones en niñas, apoyar a estudiantes y egresadas, y crear redes de mentoría, comunicación y desarrollo profesional en toda América Latina (Páez Pino, A, 2021). Complementando esta idea, se encontró otro texto que elaboró una cronología de mujeres pioneras en ingeniería en Irlanda, contextualizada con eventos sociales y políticos de inicios del siglo XX. Se usaron documentos históricos, leyes, entrevistas, registros y estadísticas del *Higher Education Authority* sobre matrícula y egreso femeninos. Se incorporaron testimonios de ingenieras pioneras y el análisis de políticas de educación y género, incluida una iniciativa universitaria de 1908 que permitió la participación femenina. La revisión bibliográfica permitió identificar el papel de las mujeres en la integración educativa. El estudio destaca la importancia de visibilizar a estas pioneras como referentes femeninos (Costello, O., & Ryan, C, 2021).

Con la revisión de estos y muchos más autores, se analizaron estrategias relevantes para el impacto del liderazgo de mujeres científicas en áreas STEM como referentes para promover la inclusión y diversidad en las nuevas generaciones, teniendo como objetivo central, visibilizar los aportes y capacidades de liderazgo de estas profesionales. De este modo, se busca inspirar y motivar a más mujeres a integrarse y permanecer en el ámbito STEM (Vega Osuna, L. A. et. al, 2025).

### 4.2 (PC2) El entorno educativo inicial limita el interés femenino en STEM.

Actualmente, las mujeres han podido incursionar en las brechas de género y sumergirse en el amplio mundo académico, adquiriendo conocimientos y convirtiéndose en profesionales notorias, situación que en tiempos anteriores era casi imposible de lograr. Sin embargo, aunque la inclusividad femenina haya aumentado, aún se presentan limitaciones educativas en el apoyo y motivación hacia el interés de las mujeres por el campo ingenieril. En una tesis de la Universidad del Externado de Colombia, se hizo un análisis de datos del SNIES (2001-2021) que muestra que solo el 38 % de los graduados en áreas STEM son mujeres, con menor participación en tecnología (23 %) e ingeniería (37,5 %). Como construcción social, la escasa representación femenina incide desde la elección de carrera hasta el

reconocimiento profesional, limitando visibilidad y oportunidades. Esta brecha se gesta desde la educación inicial, que rara vez orienta a las niñas hacia vocaciones científicas, perpetuando un sesgo invisible desde la infancia. (Cortés Barros, V. ,2021).

Buscando aumentar el interés y la participación femenina en estas áreas, se encontraron diversas propuestas que implementaron metodologías efectivas para el ámbito educativo. Un ejemplo es el proyecto Mujer en la Ingeniería de la UCR creó espacios para que mujeres exploren su afinidad por la ingeniería, fortalezcan su confianza y aprendan en comunidad. Ofreció acompañamiento técnico y emocional a universitarias, además de talleres y charlas para incentivar vocaciones STEM en colegios. Su impacto se refleja en el creciente interés de estudiantes e instituciones y en la alta satisfacción de las participantes. (Vásquez, M. C.,2022). También se encontró el proyecto “She Space”, realizado en Israel, buscó fomentar el interés de chicas de secundaria en las ciencias, especialmente en el área espacial, mediante aprendizaje activo, trabajo en equipo y la presencia de modelos femeninos. Tras el proyecto, las estudiantes mostraron mayor confianza e interés en materias STEM, y el 87 % valoró positivamente contar con un equipo femenino como guía. (Isaacson, S.,2019).

Estas propuestas, demuestran que la visibilidad y el ejercicio del poder están directamente ligados al género, y que la invisibilidad responde tanto a factores socioculturales como a estructuras institucionales. En este contexto, iniciativas como Mujer en la Ingeniería contribuyen a contrarrestar esta brecha desde etapas tempranas, incentivando el interés por STEM en niñas y jóvenes, fortaleciendo la confianza de las mujeres en el ámbito académico y profesional, y generando comunidades que promueven liderazgo y equidad (Sánchez-Moreno, M et. al, 2015).

### 4.3 (PC3) Estereotipos de género persistentes

La persistencia de los estereotipos de género en el ámbito profesional y educativo genera una barrera estructural que limita el acceso y permanencia de las mujeres en la esfera de la ingeniería. Así pues, en un artículo sobre la participación de las mujeres en la investigación de las ciencias duras, se reveló que los estereotipos de género son un factor central que perpetúa desigualdades. Estos estereotipos alimentan la falta de referentes, la baja representación en liderazgo, el techo de cristal y fenómenos como el efecto Matilda, limitando la visibilidad y el reconocimiento de las investigadoras. Como consecuencia, se generan brechas en producción, citaciones y redes de colaboración, lo que no sólo frena el desarrollo profesional de las mujeres, sino que también empobrece el ecosistema científico al desaprovechar talento altamente calificado (Ayala de Mendoza, F., et. al, 2025). Así mismo, un estudio en la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Cauca encuestó a 266 estudiantes y halló que, aunque muchos perciben trato igualitario, el 44 % ha vivido discriminación de género y más del 25 % ha presenciado desigualdad. Además, que un 53 % de las mujeres carece de autoconfianza para asumir roles de liderazgo, en parte por la ausencia de modelos femeninos visibles. Además, la baja implementación y el desconocimiento de políticas de género refuerzan las brechas existentes (Pardo Calvache, C. J., Muñoz, 2024).

En pro de reducir la discriminación y mitigar las brechas de género, se encontraron textos con propuestas competentes. Como muestra de ello, el taller Girls in Control (GiC), dirigido a niñas de 10 a 15 años, busca despertar el interés en ingeniería con contenidos comprensibles y atractivos. Se imparte en casi 20 idiomas, con materiales abiertos en línea y más de 500 participantes de todo el mundo, recibiendo comentarios muy positivos. Actualmente se prueba una versión avanzada que plantea problemas más complejos para desarrollar habilidades técnicas. La estrategia institucional de IFAC incluye mentorías, visibilización, actividades educativas y revisión crítica de estructuras organizacionales para aumentar la representación femenina. Mostrar referentes femeninos en STEM es clave para modificar percepciones y debilitar los estereotipos que afectan el autoconcepto y la elección académica de las niñas. (Jackson, R., et. al, 2021).

Con estudios como estos y otros más que se complementan, se logra obstruir la continuación y persistencia de las brechas de género en la academia, en lo profesional y, por supuesto, en la sociedad. Finalmente, un estudio de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí en la facultad Ingeniería Industrial, evidenció que el machismo genera estereotipos, trato desigual, menor acceso a oportunidades y acoso, afectando la autoestima y el desarrollo profesional de las mujeres desde la universidad. Las estrategias que se proponen son reforzar políticas de equidad, capacitar en igualdad, visibilizar referentes femeninos, promover mentorías y crear entornos inclusivos que eliminen prejuicios, garantizando la participación y liderazgo femenino en igualdad de condiciones. (Alarcón Sornoza, M. P, 2024).

## 5.CONCLUSIONES

El análisis realizado a partir de la revisión sistemática permite confirmar que las brechas de visibilidad y reconocimiento hacia las mujeres en el ámbito ingenieril conforman una problemática que permanece a pesar de los avances y las iniciativas orientadas a promover la equidad de género. Estas brechas se mantienen a través de tres problemáticas clave: la invisibilidad de referentes femeninos, las carencias presentes en el entorno educativo inicial de las niñas y la persistencia de estereotipos de género en los niveles formativos y profesionales. Cada uno de estos factores, se interrelacionan y refuerzan mutuamente, configurando un ciclo de desigualdad que limita la atracción, participación y representación de las mujeres en áreas STEM.

En lo que respecta a la falta de referentes femeninos, se identificó que la visibilización de logros y aportes realizados por mujeres en este campo, tiene un impacto directo en el interés vocacional de niñas y jóvenes. Además, la revisión mostró que su presencia sigue siendo casi nula en los planteles educativos, medios de comunicación y los espacios de representación y proyección profesional. Esta invisibilidad repercute en la percepción social de la ingeniería como un campo predominantemente masculino y mantiene la brecha de reconocimiento de las mujeres.

En cuanto a los estereotipos de género persistentes, se observa que siguen impactando de manera negativa tanto en el acceso como en la permanencia de las mujeres en el ámbito de la ingeniería. Estas creencias profundamente arraigadas a pensamientos sociales y culturales, no solo reduce el interés de elegir carreras relacionadas con cualquier disciplina STEM, sino que también frenan el crecimiento laboral, restringiendo las oportunidades para acceder a puestos de liderazgo o de mayor visibilidad académica. Además, se presentan obstáculos como la menor referencia o citación de trabajos bajo la autoría femenina, la exclusión de redes profesionales importantes y la desvalorización de sus aportes en proyectos en conjunto.

A partir de estos hallazgos, se puede concluir que clausurar las brechas de visibilidad y reconocimiento femenino, requiere de estrategias integrales y multidisciplinarias que implementen políticas de equidad de género, el fortalecimiento de ejemplares femeninos y la reestructuración de entornos educativos y laborales. Estas medidas deben contemplar no sólo la igualdad de género, sino también la formulación de condiciones que permitan el desarrollo profesional del talento femenino en el campo de la ingeniería a largo plazo. Asimismo, se recomienda realizar más investigaciones que profundicen en estas áreas, incorporando metodologías que permitan comprender cómo estas brechas afectan de manera diferenciada a las mujeres a nivel global.

## 6.REFERENCIAS

Abuwatfa, W., Zamel, N., & Al-Othman, A. (2021). Lessons learned from the underrepresentation of women in STEM: AI-enabled solutions and more. Energy And AI, 5, 100086. https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100086

Alarcón Sornoza, M. P. (2024). *El Machismo y su Incidencia en la Formación Profesional de las Mujeres Estudiantes de la Facultad de Ingeniería Industria y Arquitectura, Año 2024.* https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/5500

Ayala de Mendoza, F., Candia Crechi, P. D., Díaz Álvarez, L. E., & Oviedo Frutos, F. M. (2025). Participación de las mujeres en la investigación de las ciencias duras: Una mirada regional desde la perspectiva de la brecha de género. *Revista científica En Ciencias Sociales*, *7*, 01–11. https://doi.org/10.53732/rccsociales/e701503

Bauer, M., & Heskebeck, F. (2022). A Workplace Equality Workshop for the Control Engineering Classroom. IFAC-PapersOnLine, 55(17), 97-102. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.231

Bula, I., Kent, M. D., Bula, E., & Hajrizi, E. (2021a). Challenges of Women working as Engineers: A comparative study between Kosovo and Ireland. IFAC-PapersOnLine, 54(13), 545-550. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.506

Bula, I., Kent, M. D., Bula, E., & Hajrizi, E. (2021b). Diversity and Inclusion of Women working as Engineers: A comparative study between Kosovo and Ireland. IFAC-PapersOnLine, 54(13), 375-380. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.476

Bula, I., Kent, M. D., Retkoceri, B., O'Neill, B., Stapleton, L., Bula, E., & Hajrizi, E. (2022). An insight into human rights in the engineering workplace and education. IFAC-PapersOnLine, 55(39), 76-81. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.12.014

Çelik, H., & Watson, F. (2021). Understanding the leaky pipeline system: behavioural ecological approach to the social marketing of women thriving in STEM careers. Journal Of Social Marketing, 11(4), 616-632. https://doi.org/10.1108/jsocm-03-2021-0051

Chacón Vásquez, M., Pabón Páramo, M. A., & Salas Valerio, S. V. (2022, junio). *Mujer en la Ingeniería: iniciativas y experiencias para disminuir la brecha de género en ingeniería*. https://hdl.handle.net/10669/90269

Chatterjee, P., & Werner, R. M. (2021). Gender Disparity in Citations in High-Impact Journal Articles. *JAMA Network Open*, *4*(7), e2114509. https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2021.14509

Chowdhury, F. N., Bhattacharya, B. S., Cho, H., Faragasso, A., Gebeshuber, I. C., Ciuperca, E. M., Marinova, G., & Doyle-Kent, M. (2022). Women in STEM: Snapshots from a Few Asian Countries. IFAC-PapersOnLine, 55(39), 204-209. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.12.060

Chowdhury, F. N., Marinova, G., Ciuperca, E., Bhattacharya, B. S., & Doyle-Kent, M. (2021). The State of Play in Diversity and Inclusion in STEM–A Review of Empirical Evidence, Focusing on Gender. IFAC-PapersOnLine, 54(13), 570-575. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.510

Cortés Barros, V. (2021). La construcción del problema público de la brecha de género en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas – STEM en las carreras universitarias colombianas. Universidad Externado de Colombia. https://doi.org/10.57998/bdigital.handle.001.4412

Costello, O. (2024). What are the benefits of more women in engineering? IFAC-PapersOnLine, 58(3), 8-13. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.116

Costello, O., & Ryan, C. (2021). The Influence of Social Effects and Societal Expectations Upon Female Participation in Engineering. IFAC-PapersOnLine, 54(13), 557-563. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.508

Dengate, J., Farenhorst, A., Peter, T., & Franz-Odendaal, T. (2021). “Shining Armour”: what Margaret-Ann Armour taught us about equity, diversity, and inclusion and mentorship in the natural sciences. Canadian Journal Of Chemistry, 99(8), 692-697. https://doi.org/10.1139/cjc-2020-0296

Dick, T. J., Besomi, M., Coltman, C. E., Diamond, L. E., Hall, M., Maharaj, J., Kean, C. O., Barzan, M., & Mickle, K. J. (2024). A 100-day mentoring program leads to positive shifts in girls’ perceptions and attitudes towards biomechanics and related STEM disciplines. Journal Of Biomechanics, 173, 112244. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2024.112244

Doyle-Kent, M., & Watson, E. (2021). D&I in Engineering Education, past, present, and future: A Country Case Study of Ireland. IFAC-PapersOnLine, 54(13), 564-569. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.509

Friedmann, E. (2018). Increasing women’s participation in the STEM industry. Journal Of Social Marketing, 8(4), 442-460. https://doi.org/10.1108/jsocm-12-2017-0086

García-Peñalvo, F. J. (2022). Desarrollo de estados de la cuestión robustos: Revisiones Sistemáticas de Literatura. *Education in the Knowledge Society (EKS)*, *23*, e28600. https://doi.org/10.14201/eks.28600

Gutiérrez Pereda, I. (2017). Mujeres inventoras, mujeres ingenieras. Repositorio Abierto de la Universidad de Cantabria. http://hdl.handle.net/10902/13130

Heras Calleja, Andrés de las (2023). *Análisis de la brecha de género en ingeniería y tecnología: ¿cuáles son sus determinantes?* Tesis (Máster), E.T.S.I. Industriales (UPM). https://oa.upm.es/73811/

Hersh, M. (2017). Ethical Engineering and Respect for The ‘Other’. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 10614-10619. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1031

Hersh, M., & Doyle-Kent, M. (2023). 21st Century Engineering Workplace: How an Inclusive Culture can deliver Innovation and Value. IFAC-PapersOnLine, 56(2), 8976-8981. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.124

Hoyo, Á., Caparroz, M., Del Mar Castilla, M., Gil-Martínez, M., & Knorn, S. (2024). Fostering Female Futures: Outcomes and Insights from applying The Girls-in-Control Workshop in Spain. IFAC-PapersOnLine, 58(26), 58-63. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.10.271

Isaacson, S., Friedlander, L., Meged, C., Havivi, S., Cohen-Zada, A. L., Ronay, I., Blumberg, D., & Maman, S. (2019). She Space: A multi-disciplinary, project-based learning program for high school girls. Acta Astronautica, 168, 155-163. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.12.005

Jackson, R., Knorn, S., & Varagnolo, D. (2021). An Outline of the Story of Girls in Control and its Success in Motivating Girls Internationally. IFAC-PapersOnLine, 54(13), 381-386. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.477

Jackson, R. R., Varagnolo, D., & Knorn, S. (2024). An Assessment of Engagement, Experience, and Attitudes after Participation in the Girls in Control Workshop. IFAC-PapersOnLine, 58(25), 25-30. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.10.232

Johnsson, C., Jönsson-Belyazid, U., Westin, E., Soltesz, K., Hägglund, T., & Bauer, M. (2023). Historical Female Influencers in Automatic Control. IFAC-PapersOnLine, 56(2), 4693-4698. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.989

Kent, M. D., Costello, O., & Kopacek, P. (2019). “Where are all the Irish women engineers: a case study”. IFAC-PapersOnLine, 52(25), 136-141. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.461

Kitada, M., & Harada, J. (2019). Progress or regress on gender equality: The case study of selected transport STEM careers and their vocational education and training in Japan. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 1, 100009. https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100009

Kuchanskyi, O., Andrashko, Y., Biloshchytskyi, A., Omirbayev, S., Mukhatayev, A., Biloshchytska, S., & Faizullin, A. (2023). Gender-Related Differences in the Citation Impact of Scientific Publications and Improving the Authors' Productivity. *Publications*, *11*(3), 37. https://doi.org/10.3390/publications11030037

Marinova, G., Bitri, A., & Ibro, M. (2021). The Role of Women in the Digital Age: Balancing professional and personal challenges during the COVID-19 pandemic. IFAC-PapersOnLine, 54(13), 539-544. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.505

Marinova, G., Canese, V., Delorme, L., & Chowdhury, F. (2022). Women in STEM in Paraguay. IFAC-PapersOnLine, 55(39), 192-197. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.12.055

Martínez-Galaz, C. P., Del Campo, V. I., & Palomera-Rojas, P. V. (2022). Voces de mujeres en ingeniería: experiencias académicas, obstáculos y facilitadores para permanecer en las carreras. *Formación Universitaria*, *15*(4), 59-68. https://doi.org/10.4067/s0718-50062022000400059

Moreno Castañeda, N. J. (2025). Metodologías de enseñanza – aprendizaje y su aplicación en las asignaturas de Ingeniería industrial: una revisión sistemática. *Repositorio Universidad Militar Nueva Granada*.

Moreno Ocampo, I. (2022). Experiencia multimedia interactiva como medio de sensibilización sobre la participación y reconocimiento de la mujer en la ingeniería. (trabajo de grado - pregrado). Universidad Autónoma de Occidente. Recuperado de https://hdl.handle.net/10614/13682.

Páez Pino, A. (2021). *Cátedra Abierta Latinoamericana Matilda y las Mujeres en Ingeniería*. Revista de Ingeniería, Centro de Ingenieros de la Provincia de Buenos Aires, 52–54. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/109972

Pardo Calvache, C. J., Muñoz-Zambrano, I., & Suescún Monsalve, E. (2024). Percepciones sobre igualdad, inclusión y liderazgo de género en estudiantes de una universidad pública de Colombia. *Revista Virtual Universidad Católica Del Norte*, (71), 212–244. https://doi.org/10.35575/rvucn.n71a10

Radovic, D., Irigoin, G. Z., Maluje, C. T., Salazar, S. M., Guzman, S. C., & Hakim, Z. G. (2024). A siete años de una política de acción afirmativa para el ingreso de mujeres a Ingeniería: Impacto en trayectorias académicas e inclusión en la cultura. *Pensamiento Educativo Revista de Investigación Educacional Latinoamericana*, *61*(1). https://doi.org/10.7764/pel.61.1.2024.1

Rathmann, L., Villarreal, M., Garibay, M. T., Godoy, M. V., Leiva, A., Liscovsky, P., Martínez, M., & Perduca, M. (2022). Comisión Mujer en Ingeniería del CONFEDI: Por más mujeres en ingeniería. *Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería 2021 – Tomo II*, 762–765. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Luis Fernández Luco (Comp) https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/245038/Libro%20CADI_TOMO1_22-11-18.pdf?sequence=8&isAllowed=y

Sánchez-Moreno, M., Tomás Folch, M., & Lavié Martínez, JM (2013). Visibilidad y poder de las mujeres en instituciones universitarias. Education Policy Analysis Archives/Archivos Analíticos de Políticas Educativas, 21 (), 1-26. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=275029728032

Shanahan, B. W., & Doyle-Kent, M. (2023). Mentorship in Engineering: Women, Inclusivity and Diversity – A challenge for our times. IFAC-PapersOnLine, 56(2), 8970-8975. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.107

Sharma, J., Yarlagadda, T., Sharma, S., & Yarlagadda, P. K. (2019). Vertical Segregation: Issues and Challenges of Women Engineers in Australia. Procedia Manufacturing, 30, 671-676. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.074

Shyriaieva, N., Guţu-Chetruşca, C., Marinova, G., Doyle-Kent, M., & Chowdhury, F. (2024). Women in Engineering in Eastern Partnership Countries: Case Study in Ukraine and Moldova. IFAC-PapersOnLine, 58(3), 20-25. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.118

Solberg, M. (2018). Can the implementation of aerospace science in elementary school help girls maintain their confidence and engagement in science as they transition to middle school? Acta Astronautica, 147, 462-472. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.03.043

Vega Osuna, L. A., Vega Esparza, R. M., Alvarado-Peña, L. J., Ramírez Gómez, J. F., Muñoz Castorena, R. V., & Reyes Bazúa, X. (2025). Liderazgo de la mujer en áreas STEM: Clave para la promoción de la inclusión y la diversidad. *Mujer Andina*, *3*(2), 1–14. https://doi.org/10.36881/ma.v3i2.987

Women engineers are raising the bar. (2018). World Pumps, 2018(9), 37-39. https://doi.org/10.1016/s0262-1762(18)30338-9

# Vinculación entre uso de inteligencia artificial y éxito académico

Löwi, Débora J.; Perotti, Marcelo G.; Polano, Francisco J.; Gentile, Guillermina J.

*Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA)*
dlowi@itba.edu.ar; mperotti@itba.edu.ar; fpolano@itba.edu.ar; ggentile@itba.edu.ar

**RESUMEN**

Este trabajo busca establecer una conexión entre el uso de la inteligencia artificial (IA) y el éxito en el curso de ingreso a la universidad de estudiantes de ingeniería industrial. Se trabajó con 43 alumnos, de los cuales 36 utilizaron alguna herramienta de IA para estudiar matemática, física, o química.

En cuanto al éxito académico, definido como la promoción de las materias, sin rendir exámenes finales, de los 15 estudiantes de ingeniería industrial que lograron promocionar las tres materias, 13 utilizaron IA. Esto sugiere una correlación positiva entre el uso de IA y la promoción, aunque no es exclusiva. Es importante destacar que el uso de IA no garantizó el éxito, como lo demuestra que la mayoría de los usuarios de IA, tuvieron que rendir al menos un examen final.

Los principales motivos por los que los estudiantes manifestaron haber desaprobado fueron falta de comprensión de los contenidos, falta de práctica, no dedicar el tiempo suficiente, conocimientos previos inadecuados, y no comprender correctamente los enunciados. En concordancia, los usuarios de IA, manifestaron que los ayuda en sus estudios, porque les permite entender los fundamentos, practicar más, aprender más, y ser más rápidos en la resolución de problemas. Esto indica que la IA es percibida como una herramienta para mitigar directamente las causas de desaprobación.

Las opiniones sobre la eficacia de la IA varían según el éxito académico: quienes tuvieron más dificultades mostraron percepciones más divididas, mientras que los estudiantes con mayor aprobación la evaluaron consistentemente como "eficaz" o "muy eficaz".

Finalmente, se observa que el uso de IA no compensa hábitos negativos de procrastinación; quienes tienen mejores hábitos digitales (menos tiempo y distracción) tienden a ser más exitosos, usen IA o no, lo que refuerza la idea de que la IA es útil solo si se integra en una rutina de estudio efectiva.

**Palabras Clave:** Inteligencia artificial. Ingreso a ingeniería. Éxito académico. Rendimiento estudiantil.

**ABSTRACT**

This study seeks to establish a connection between the use of artificial intelligence (AI) and success in the university entrance course of industrial engineering students. The study involved 43 students, 36 of whom used an AI tool to study mathematics, physics, or chemistry.

Regarding academic success, defined as passing the courses without taking final exams, of the 15 students of industrial engineering who passed all three courses, 13 used AI. This suggests a positive correlation between the use of AI and promotion, although it is not exclusive. It is important to note that the use of AI did not guarantee success, as evidenced by the fact that most AI users had to take at least one final exam.

The main reasons students reported failing were a lack of understanding of the content, lack of practice, not dedicating enough time, inadequate prior knowledge, and not properly understanding the statements. Accordingly, AI users stated that it helps them in their studies because it allows them to understand the fundamentals, practice more, learn more, and solve problems faster. This indicates that AI is perceived as a tool to directly mitigate the causes of failure.

Opinions on AI's effectiveness vary according to academic success: those who had more difficulties showed more divided perceptions, while students with higher approval consistently rated it as "effective" or "very effective."

Finally, it is observed that the use of AI does not compensate for negative procrastination habits; those with better digital habits (less time and distractions) tend to be more successful, whether they use AI or not, reinforcing the idea that AI is useful only if integrated into an effective study routine.

**Keywords:** Artificial intelligence. Engineering admissions. Academic success. Student performance

## 1. INTRODUCCIÓN

La integración de la inteligencia artificial (IA) en la educación superior está reconfigurando los hábitos de estudio y las estrategias de aprendizaje de los estudiantes universitarios, especialmente en carreras de alta exigencia como ingeniería industrial. En este contexto, resulta fundamental comprender cómo los futuros ingenieros adoptan herramientas digitales, gestionan el tiempo de estudio y enfrentan las distracciones propias de la era digital. Este trabajo analiza las prácticas de 43 estudiantes de ingeniería industrial, diferenciando entre quienes aprobaron las materias del curso de ingreso por promoción y aquéllos que debieron rendir exámenes finales en física, química y/o matemática, con el objetivo de identificar los factores que inciden en el rendimiento académico, incluyendo el uso de la IA y la percepción que tienen sobre ella.

A través del análisis de las prácticas y percepciones de estos estudiantes, se busca identificar no sólo la repercusión del uso de IA en la formación académica, sino también cómo se integra esta herramienta en las rutinas de estudio y su relación con factores críticos como la procrastinación y las distracciones digitales. Al comprender mejor estas dinámicas, la investigación aporta evidencia valiosa para poder diseñar estrategias pedagógicas que potencien el aprendizaje efectivo mediante la integración adecuada de la IA, promoviendo así una formación universitaria más eficiente y personalizada. Esta integración se revela como un factor clave para el desarrollo de futuros ingenieros capaces de enfrentar los desafíos académicos y profesionales con herramientas tecnológicas avanzadas y hábitos de estudio sólidos.

Estudios previos han evidenciado que la integración de la IA en la educación superior está transformando significativamente los hábitos de estudio y las estrategias de aprendizaje, al identificar cómo los futuros ingenieros adoptan herramientas digitales para gestionar no sólo el tiempo de estudio, sino también las distracciones del entorno digital, factores clave para el éxito académico en la educación superior actual (López López et al. 2023). Este estudio enfatiza la necesidad de comprender cómo las herramientas tecnológicas, incluyendo la IA, se integran en las rutinas diarias de los estudiantes para potenciar el aprendizaje. Por otra parte, existe evidencia sobre la relación entre el uso de IA y la mejora en la formación académica, señalando que la tecnología no sólo facilita la comprensión de contenidos complejos de materias como matemática, física y química, sino que también es un factor clave para desarrollar hábitos de estudio sólidos y organizados, mitigando comportamientos negativos como la procrastinación (Marroquín Dávila, 2024).

Estos estudios convergen en que el uso estratégico y disciplinado de la IA, integrado en una rutina de estudio eficiente, es fundamental para mejorar el rendimiento académico en carreras exigentes. La combinación de IA con una adecuada gestión del tiempo y control de distracciones digitales se presenta como un factor decisivo para que los estudiantes universitarios logren el éxito académico y estén preparados para enfrentar retos profesionales con herramientas tecnológicas avanzadas.

Otras investigaciones han resaltado que la procrastinación académica constituye un factor crítico que afecta directamente el rendimiento de los estudiantes de ingeniería. El estudio de Wilhelm y Nijman (2023), señala que la procrastinación es altamente prevalente entre estudiantes de ingeniería y se relaciona con menores niveles de desempeño académico. Estos hallazgos se alinean con la necesidad de comprender cómo los hábitos digitales y el uso de IA interactúan con la capacidad de los estudiantes para gestionar su tiempo y evitar conductas dilatorias.

En nuestro trabajo, pudimos comprobar que la IA por sí misma no garantiza el éxito académico y que el complementar técnicas de estudio tradicionales con los beneficios de diferentes herramientas específicas bien aplicadas es una tarea a desarrollar en las universidades para propiciar un aprendizaje eficaz.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Características de la muestra

Esta investigación se llevó a cabo en el Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), durante marzo de 2025. Participaron del estudio 214 estudiantes que lograron ser admitidos a las distintas carreras de ingeniería que se imparten en el ITBA. Para el presente trabajo consideramos únicamente los 43 estudiantes de ingeniería industrial y solamente las materias troncales del ingreso, matemática, física y química. De éstos, 52% se identifican con el género femenino y 48% con el masculino. El 82% tienen entre 19 y 20 años.

Hubo 15 estudiantes que promocionaron (rindieron exámenes parciales y al obtener altas calificaciones fueron eximidos de dar examen final) las tres materias, de los cuales 13 usaron IA para estudiar; 9 promocionaron dos materias y rindieron final de una materia (6 usaron IA para estudiar); 9 promocionaron una materia y rindieron dos finales (8 usaron IA para estudiar); 9 rindieron tres finales (7 usaron IA para estudiar) y 1 alumno promocionó dos materias y recursó la tercera, habiéndola promocionado la segunda vez que la cursó, y usó IA para estudiar.

### 2.2 Instrumento para la recogida de datos

Con el objeto de recoger las percepciones de los estudiantes sobre el uso de la IA, se diseñó un formulario de Google Forms que incorporó una serie de preguntas abiertas, preguntas de opción múltiple, y preguntas en formato de escala tipo Likert con tres o cinco niveles de valoración.

### 2.3 Procedimiento y análisis

El enfoque metodológico de esta investigación fue cuantitativo, no experimental, transversal, y de alcance descriptivo, inferencial, y exploratorio. Se utilizó un diseño no experimental debido a que no se manipuló ninguna variable, sino que se observó el comportamiento de estas en su contexto natural. El enfoque transversal permitió la recolección de datos en un único momento temporal, sin seguimiento a lo largo del tiempo.

La muestra fue seleccionada de manera aleatoria, asegurando que todos los elementos de la población objetivo tuvieran una probabilidad conocida y no nula de ser seleccionados. Esta estrategia permitió una mayor representatividad y generalización de los resultados. La población objetivo estuvo conformada por estudiantes del ITBA que se encontraban cursando el primer año de las carreras de ingeniería.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Resultados

Hay ciertas características comunes que pueden mencionarse con respecto a los alumnos que aprobaron las tres materias por promoción. Todos recalcan la importancia de elaborar sus propios materiales de estudio, resolviendo solos la mayor cantidad de ejercicios y haciendo resúmenes; lo que lleva a destacar una preferencia por el aprendizaje activo y el situarse como actores principales en el proceso. La mayoría consideró que ir a las clases con los temas previamente leídos es una práctica que les ha sido de gran ayuda, resaltando una estrategia proactiva y organizada para abordar el estudio. Declararon estudiar semanalmente física y química fuera de clases, pero para matemática, algunos aumentaron la frecuencia de estudio y lo hacían todos los días. Destacamos que esta dedicación regular y consistente a todas las materias pareciera ser un factor clave en el éxito alcanzado.

Como se puede ver en las figuras 1 a 3 la mayoría de estos estudiantes dedicó a cada sesión de estudio más de 3 horas para matemática, 2 a 3 horas o más para física, sin embargo, el tiempo dedicado a química fue menor en varios casos. Estos alumnos, cuando se sienten abrumados por una tarea académica, prefieren realizar actividad física o dormir, en lugar de continuar trabajando. Esto indica que el descanso, o una pausa para desconectar, es una estrategia habitual para manejar el estrés académico en este grupo. Por otro lado, analizando la figura 4, la mitad manifestó encontrarse desplazándose por sus redes sociales sin un propósito claro dos veces al día -entre 10 y

30 minutos - mientras tienen tareas pendientes. Si bien se distraen con las redes sociales, este grupo tiende a limitar el tiempo de dichas distracciones. También hubo respuestas como mirar películas o series, navegar por internet, jugar videojuegos, tocar algún instrumento, leer las noticias, salir de su casa, y socializar.

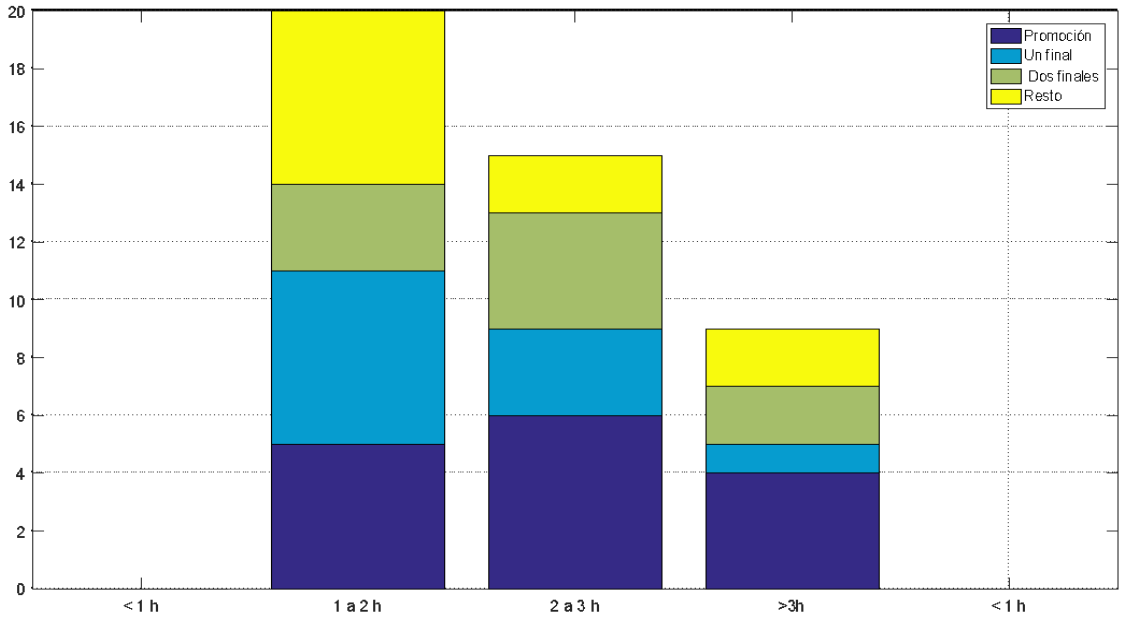



*Figura 1: Tiempo de estudio de Física por sesión* función de finales rendidos entre las 3 asignaturas

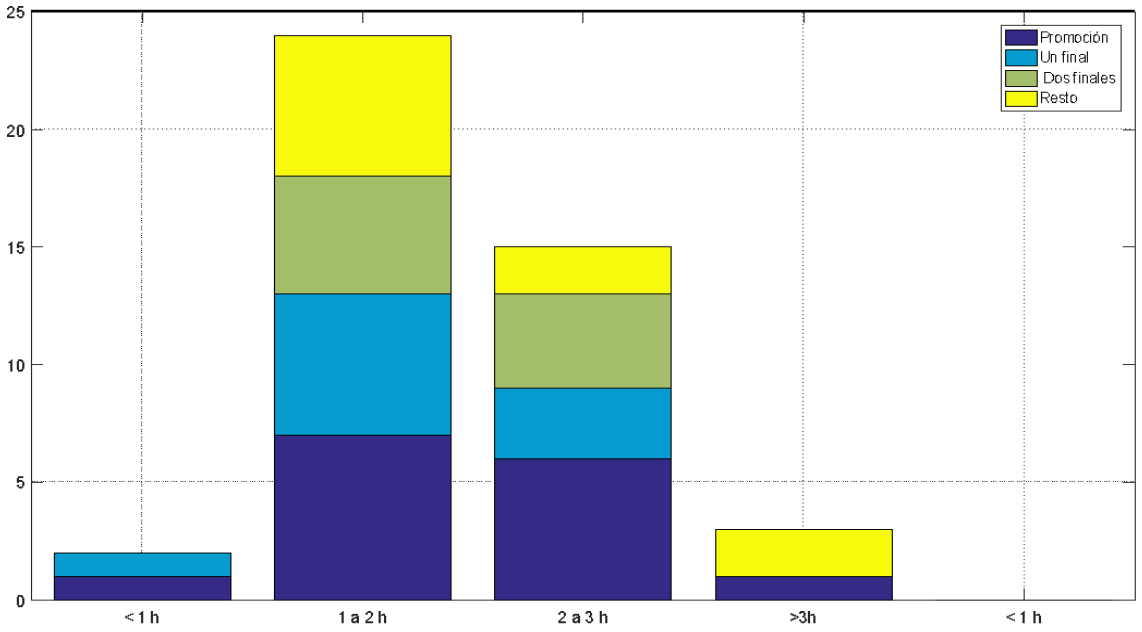



*Figura 2: Tiempo de estudio de Química por sesión* función de finales rendidos entre las 3 asignaturas

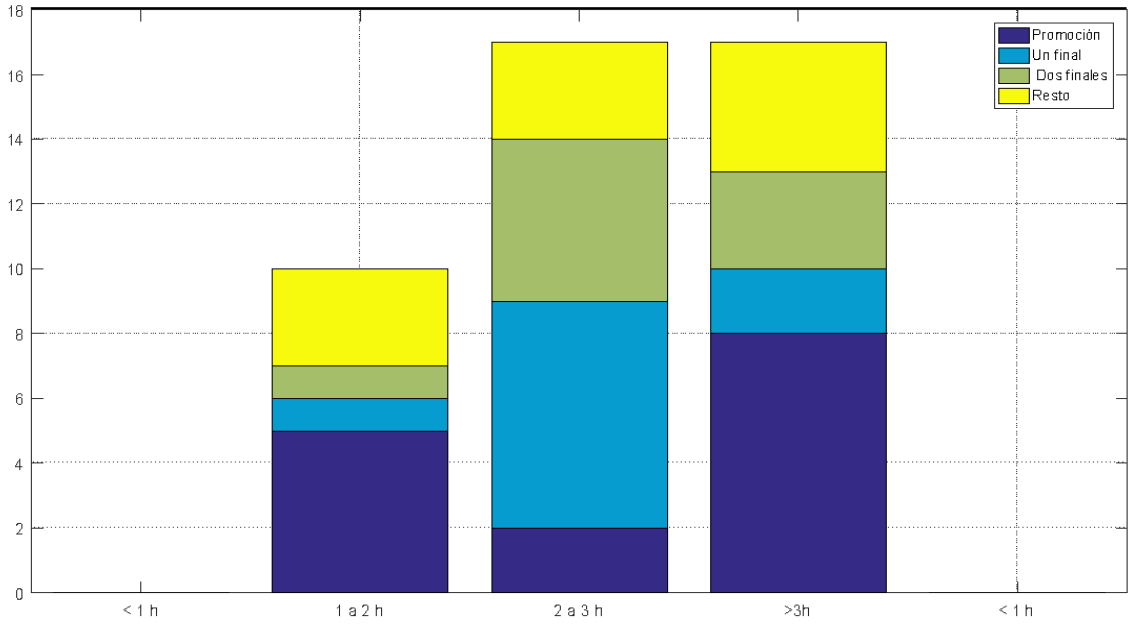



*Figura 3: Tiempo de estudio de Matemática por sesión* función de finales rendidos entre las 3 asignaturas

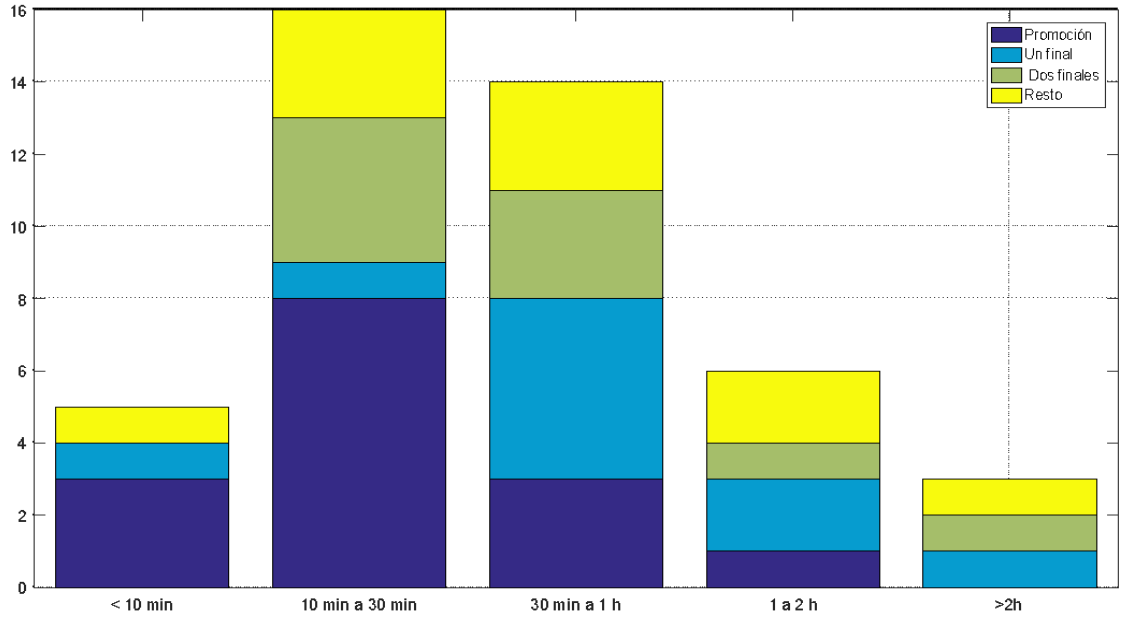



*Figura 4: Tiempo en redes sociales* en función de finales rendidos entre las 3 asignaturas

Utilizar recursos en línea fue una práctica que este grupo de alumnos consideró eficaz y de gran ayuda en los estudios. Este dato, sumado a su inclinación por la IA, resalta el aprovechamiento de herramientas digitales para su formación académica. Además de entender los fundamentos, valoran el uso de la IA específicamente para practicar más y la consideran eficaz, lo que nos permite a los profesores pensar a la IA como una herramienta para la aplicación y consolidación de conocimientos. La mitad piensa que les sería más fácil aprobar una materia usando las herramientas adecuadas de IA. Los propósitos más comunes se pueden ver en la figura 5; estos son: entender los fundamentos, practicar más, aprender más, y ser más rápido en la resolución de los problemas. También fueron mencionados aspectos como no caer en las trampas que tienen los problemas, predecir qué clase de problemas se toman en los exámenes, confirmar si resolvieron bien los ejercicios, no equivocarse con errores pequeños que luego afectan la resolución, y comprobar respuestas.

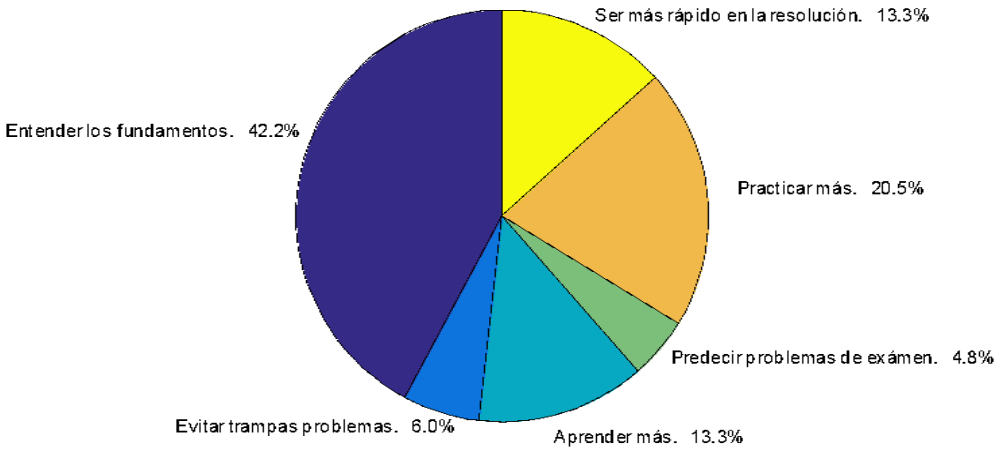



*Figura 5:* Motivación para el uso de IA por parte de los estudiantes

Comparando las respuestas de los alumnos que promocionaron las tres materias con las del resto de los estudiantes, se pudieron observar marcadas coincidencias. Ambos grupos utilizaron en gran medida la IA para estudiar y la califican como eficaz o muy eficaz, los principales propósitos fueron entender los fundamentos y practicar más, destacan el obtener una retroalimentación inmediata, la personalización de las respuestas y la variedad de formatos. Una diferencia entre ambos grupos es que los que no promocionaron las tres materias no estudian tanta cantidad de horas ni con tanta asiduidad. Ambos grupos comparten las mismas actividades principales para lidiar con el agobio académico: distraerse con redes sociales, dormir y realizar actividad física. Entre ambos grupos existe una diferencia marcada en la autodisciplina en el manejo del tiempo de estudio. La mayoría de los que promocionaron las tres materias mostró una mayor capacidad para limitar el tiempo dedicado a distracciones en redes sociales (el 80% menos de 30 minutos y ninguno más de dos horas), mientras que el otro grupo tenía lapsos de distracción más prolongados, incluyendo algunos casos de tiempo excesivo (9,5% más de dos horas). Además, la frecuencia de distracción por el uso de redes sociales fue menor en el primer grupo.

Como muestra la figura 6, más de la mitad de los alumnos cree que la IA puede facilitar aprobar materias. Las razones predominantes por las cuales los alumnos creen que desaprobaron exámenes fueron de índole emocional, como por ejemplo, falta de concentración, nerviosismo, falta de preparación adecuada, lo cual indica que el manejo de las emociones y la gestión del tiempo son factores clave en el éxito académico.

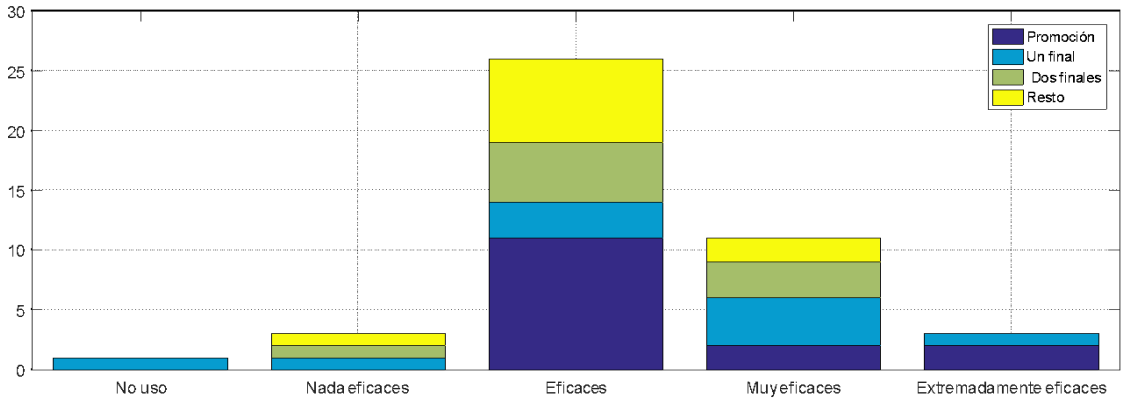



*Figura 6:* Percepción de la eficiencia del uso de IA para la aprobación en función de finales rendidos entre las 3 asignaturas

Se puede entender que los estudiantes resultan más o menos exitosos, no por el simple hecho de usar o no usar la IA, sino por cómo la integran a su estudio. Los menos exitosos suelen estudiar menos asiduamente, durante períodos más cortos y con más interrupciones y se distraen más fácilmente. Por otro lado, algo remarcable, es que los menos exitosos mencionan una falta de

comprensión de contenidos previos e insuficiente práctica. Los más exitosos muestran un mayor convencimiento en que la IA les facilitará aprobar, que podría indicar un uso más estratégico de herramientas complementarias, como usar IA y verificar con plataformas del estilo Wolfram Alpha o con ejercicios resueltos.

Entre las herramientas puntualmente mencionadas por los alumnos para estudiar, se destacaron asistentes virtuales como ChatGPT y otros chatbots (36 menciones), aplicaciones de tutoría como Khan Academy y Coursera (11 menciones), plataformas de resolución y cálculo como Wolfram Alpha y Chegg (10 menciones), generadores de contenido como OpenAI (10 menciones), simuladores de laboratorio como PhET Interactive Simulations y Labster (2 menciones), recursos de estudio personalizados como Quizlet (3 menciones), y recursos de animación 3D como ChemDraw (1 mención). Este listado refleja el panorama concreto de las herramientas utilizadas, donde predominan los asistentes conversacionales y las plataformas de resolución de problemas.

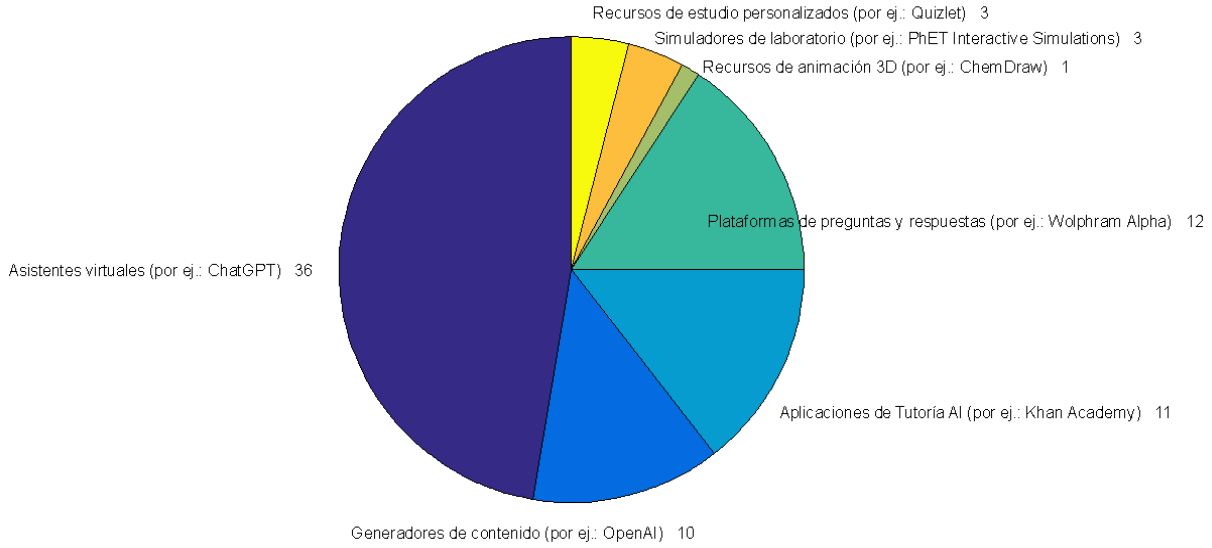



*Figura 7: Herramientas IA utilizadas en el estudio*

### 3.2 Discusión

Los estudiantes valoran la personalización del aprendizaje que ofrece la IA porque permite adaptar los contenidos, el ritmo y la retroalimentación a sus necesidades específicas, promoviendo un aprendizaje más efectivo y significativo, lo cual se halla en concordancia con estudios previamente publicados (Armijos Saca et al., 2025). Esta personalización se basa en sistemas que analizan datos del estudiante para ofrecer recursos y apoyo ajustados a sus dificultades y estilo de aprendizaje, lo cual mejora la motivación y el rendimiento (Marroquín Dávila, 2024; Redtis, 2023).

La característica “personalización del contenido” fue la más mencionada como esencial por los estudiantes en el uso de IA, lo que sugiere que no solo valoran la explicación, sino que quieren sentir que el contenido “les habla a ellos” y no a un grupo genérico. Esto se puede ver reflejado de varias maneras: la IA puede adaptarse al nivel de conocimiento del estudiante; si éste tiene carencias en los fundamentos, la IA puede simplificar y repasar desde las bases; en cambio, si ya domina lo básico, el estudiante puede pedir a la IA ejercicios más complejos o explicaciones avanzadas. Control del ritmo de aprendizaje: los alumnos pueden avanzar más rápido en temas fáciles para ellos y dedicar más tiempo a los difíciles, sin tener que esperar a que toda la clase esté en el mismo punto. Formato adaptado a preferencias personales, ya que algunos prefieren resúmenes escritos y otros videos o diagramas.

Se pueden delinear algunas recomendaciones concretas para los estudiantes, como por ejemplo, reducir las interrupciones (desactivar notificaciones y usar bloqueadores de redes sociales durante el tiempo de estudio), períodos de estudio más largos y focalizados (de 90 a 150 minutos), uso activo de IA (fomentar la generación y resolución de problemas con IA, no sólo leer explicaciones, utilizando prompts productivos), verificar respuestas de IA (cruzando información con herramientas como

Wolfram Alpha, soluciones modelo o consultas a docentes y tutores para evitar errores), diagnóstico de bases (realizar mini-tests de conocimientos previos para identificar y cerrar brechas fundamentales).

En cuanto a sugerencias para docentes e instituciones se pueden enfocar en activar feedback inmediato (implementar quizzes cortos con corrección automática para que los estudiantes puedan practicar y recibir retroalimentación rápida) promover prácticas efectivas (fomentar el "hacer muchos ejercicios propios", la elaboración de mapas conceptuales y el establecimiento de horarios de estudio regulares), ofrecer material guía para el uso de IA (ejemplos de prompts efectivos, listas de chequeo para validar respuestas y ejercicios que requieran justificación y explicación), monitorear y apoyar a quienes procrastinan (ofrecer talleres sobre gestión del tiempo y control de distracciones, así como seguimiento personalizado para estudiantes que reporten altos niveles de distracción digital).

Si bien los estudiantes ya recurren de forma intensiva a ChatGPT, Khan Academy y Wolfram Alpha, la literatura y nuestra experiencia sugieren que el aprendizaje en ingeniería puede potenciarse combinando estas herramientas con otras más específicas. En física, por ejemplo, los asistentes conversacionales (ChatGPT, Claude, Gemini) pueden complementarse con plataformas de cálculo simbólico como Symbolab y con simuladores virtuales como PhET Interactive Simulations o Algodoo para la visualización de fenómenos. En química, además de los recursos ya mencionados, pueden incorporarse Perplexity AI para la explicación de conceptos, ChemBuddy para cálculos y balanceo, y visualizadores moleculares como MolView o PhET Chemistry. De esta manera, el énfasis no solo está en el uso de herramientas ya populares entre los estudiantes, sino también en ampliar y diversificar los recursos disponibles para que se adapten mejor a las necesidades específicas de cada disciplina.

Por último, nuestros resultados muestran que los estudiantes con mejores hábitos digitales y menor procrastinación tienden a ser más exitosos, independientemente del uso de IA. Este hallazgo coincide con Wilhelm y Nijman (2023), quienes señalan que la procrastinación académica es particularmente problemática en estudiantes de ingeniería, donde la carga de trabajo y la necesidad de práctica constante exigen altos niveles de autodisciplina. La evidencia internacional, junto con nuestros datos locales, refuerza la conclusión de que el control de la procrastinación es un factor clave en el éxito académico.

En síntesis, los hallazgos confirman que la integración de la IA en los procesos de estudio sólo resulta beneficiosa cuando se combina con hábitos de aprendizaje consistentes y una gestión adecuada del tiempo. La IA emerge como un recurso capaz de personalizar contenidos, ofrecer retroalimentación inmediata y ampliar las oportunidades de práctica, pero no logra contrarrestar los efectos negativos de la procrastinación y la falta de disciplina.

## 4. CONCLUSIONES

La investigación sobre la vinculación entre el uso de la IA y el éxito académico en el curso de ingreso a Ingeniería Industrial del ITBA revela una verdad fundamental: la IA no es una panacea que compense los hábitos de estudio deficientes, sino una herramienta potente cuyo valor reside en cómo se integra en una rutina de estudio sólida y organizada. Aunque la adopción de herramientas de IA es alta y comparable entre estudiantes exitosos y no exitosos, el éxito académico se correlaciona más fuertemente con la autodisciplina, la consistencia y la duración de las sesiones de estudio.

En conclusión, el factor determinante del éxito no es la mera utilización de la IA, sino la calidad de los hábitos de estudio de cada estudiante. La IA emerge como un facilitador y un complemento valioso cuando se utiliza de manera activa y estratégica, por ejemplo, para generar ejercicios, verificar resultados o reforzar fundamentos. En última instancia, el futuro éxito de los ingenieros en formación dependerá de su capacidad para desarrollar una autodisciplina robusta y estrategias de aprendizaje efectivas, con la inteligencia artificial sirviendo como un aliado poderoso para potenciar, pero nunca reemplazar, el compromiso y el esfuerzo personal.

## 5. REFERENCIAS

Armijos Saca, R. A., Gutiérres Vargas, M. M., Crespo Gordillo, B. Z., Espinoza Agila, L. E., & Púa Pilay, J. E. (2025). La inteligencia artificial (IA) en la personalización del aprendizaje en el aula. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 9(1), 7590-7601. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16427

López López, H. L., Rivera Escalera, A., & Rossell Cruz García, C. (2023). Personalización del aprendizaje con inteligencia artificial en la educación superior. Redtis. Revista Digital de Tecnologías Informáticas y Sistemas, 7(1), 123-128. https://doi.org/10.61530/redtis.vol7.n1.2023.165.123-128

Marroquín Dávila, C. R. (2024). La inteligencia artificial y sus aportes a la personalización del aprendizaje. Revista DIDAC, 84, 103-112. https://didac.ibero.mx/index.php/didac/article/view/218

Wilhelm, P., & Nijman, J. (2023). Academic Procrastination In Engineering Students. European Society for Engineering Education (SEFI). https://doi.org/10.21427/T0KH-SG55

# NIVEL DE ADQUISICIÓN DE COMPETENCIAS GENÉRICAS EN ESTUDIANTES AVANZADOS Y GRADUADOS RECIENTES DE INGENIERÍA

Onaine, Adolfo Eduardo; Santille, Luciana Soledad; Artigas, Maria Velia

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata*
aeonaine@fi.mdp.edu.ar; lsantille@fi.mdp.edu.ar; mvartigas@fi.mdp.edu.ar

**RESUMEN**

A partir de los estudios que se han desarrollado por el grupo de investigación sobre la temática de competencias en organizaciones, se realiza en este trabajo una comparación entre dos muestras sobre el nivel de adquisición de competencias genéricas. La primera muestra está integrada por profesionales con no más de cinco años como ingenieros y la segunda muestra está compuesta por estudiantes próximos a graduarse o recientemente graduados. Se parte de un estudio exploratorio y descriptivo que indaga el comportamiento de cuatro competencias genéricas: *identificar, formular y resolver problemas de ingeniería*, *desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo, comunicarse con efectividad,* y *aprender en forma continua y autónoma*. La información se obtiene mediante un cuestionario virtual estructurado con opción de respuesta múltiple que utiliza una escala tipo Likert para ambas muestras. De los resultados se espera poder obtener información significativa como punto de partida de un proceso de monitoreo de los nuevos planes de estudio que se están implementando en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

**Palabras Claves:** indicadores, competencias en ingeniería, estudiantes/graduados, enseñanza superior.

**ABSTRACT**

Based on the studies conducted by the research group on the topic of organizational competencies, this paper compares two samples on the level of acquisition of generic competencies. The first sample consists of professionals with no more than five years of experience as engineers, and the second sample consists of students close to graduation or recent graduates. This is based on an exploratory and descriptive study that investigates the behavior of four generic competencies: identifying, formulating, and solving engineering problems; performing effectively in work teams; communicating effectively; and learning continuously and independently. Information is obtained through a structured online questionnaire with multiple-choice options and a Likert-type scale for both samples. The results are expected to provide significant information as a starting point for monitoring the new curricula being implemented at the Faculty of Engineering of the National University of Mar del Plata.

**Keywords:** indicators, engineering competencies, students/graduates, higher education.

## 1. INTRODUCCIÓN

El grupo de investigación, en publicaciones previas, ha tomado como objeto de estudio las percepciones de estudiantes de ingeniería sobre sus vivencias durante el periodo de la Pandemia por Covid en relación a la educación virtual, así como también las percepciones sobre la inserción de competencias en sus planes de estudio. Actualmente la problemática que guía la praxis se sitúa en cúal es la brecha entre las percepciones de estudiantes avanzados y graduados en ingeniería sobre su perfil de competencias. Es decir: ¿Están ellos conformes con la formación recibida y la consideran suficiente para poder cumplir con lo requerido en el contexto laboral?

Para el trabajo se toman antecedentes nacionales e internacionales sobre la temática de percepciones en la adquisición de competencias en estudiantes y graduados en ingeniería. En Argentina, miembros de un grupo de investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Lomas de Zamora, realizaron una investigación descriptiva, recolectando datos con una encuesta sobre dos de las capacidades asociadas a una competencia genérica tecnológica para ingeniería (Comoglio et al., 2018). La indagación realizada a sus egresados demuestra que se cubren las expectativas de los graduados de ingeniería en relación a adquisición de dos de las capacidades asociadas a la competencia: Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería, como así mismo Concebir, diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería. Por otra parte, investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto estudiaron las perspectivas y valoraciones de los graduados de ingeniería en relación con las competencias genéricas y se consideraron sus apreciaciones a partir de los lineamientos de Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI) sobre la necesidad de una enseñanza basada en competencias. Su publicación hace foco en el análisis de cinco investigaciones previas realizadas en su facultad, ellos destacan la importancia de las competencias transversales o genéricas para la inserción y el desempeño profesional (Paoloni et al., 2019). Bejarano, Panica y Garay (2022) de la Universidad Católica de Santiago del Estero del Departamento Académico San Salvador de Jujuy realizó un estudio sobre las habilidades blandas o *soft skills* requeridas y valoradas en estudiantes universitarios y graduados de carreras de ingeniería. Se planteó un enfoque cuantitativo, de carácter exploratorio descriptivo, con encuestas online, a estudiantes de Ingeniería en Informática. El grupo expuso que se evidencia la importancia de fortalecer las habilidades de liderazgo e inteligencia emocional en los estudiantes.

En el ámbito internacional, Marzo Navarro et al. (2006) de la Universidad de Zaragoza, analizaron las competencias profesionales que las empresas demandan a los ingenieros, comparando entre los perfiles que requiere el mercado laboral español y los perfiles de los egresados. Los autores se interesaron por detectar la brecha entre las competencias y habilidades alcanzadas por los egresados y las demandadas por las organizaciones con el objeto de ajustar los planes de estudio correspondientes. En su publicación se evidencia que es necesario mejorar el desarrollo de las competencias tales como: capacidad de comunicación, capacidad de trabajo en equipo, habilidad para el aprendizaje continuo, conocimiento de idiomas e informática, flexibilidad, capacidad de liderazgo y de innovación. En Chile, en la Universidad de Talca, se indaga el impacto sobre la comunidad universitaria, dado que han implementado en 2005 un programa de formación de competencias transversales (Schmal y Rodolfo, 2012). Se aplicaron encuestas a una muestra de 49 graduados y se evidenció un resultado positivo en el desarrollo de las mencionadas competencias. Con los resultados se genera una propuesta de cambio que indica la reducción del tamaño del plan de carrera, su redistribución y alineado a los requerimientos del mercado de trabajo. En México, los investigadores, Neri Torres y Hernández Herrera (2019) trabajaron sobre la percepción respecto a la adquisición de competencias blandas de estudiantes avanzados de las carreras de ingeniería de un instituto tecnológico federal de la ciudad de México. Su investigación reunió a una muestra de 929 sujetos dando como resultado la falta de habilidades sociales y emocionales, la resolución de problemas, la falta de comunicación, de estrategias para el eficiente procesamiento de información y poca creatividad. Se evidencia que las habilidades blandas y competencias sociales en ingeniería son una necesidad insatisfecha en egresados competentes. Finalmente en Panamá, Liseyka y Nicholson (2022) indagaron para identificar las competencias blandas en estudiantes pertenecientes a la rama de la ingeniería. En esta investigación se propuso realizar un análisis de cómo influyen estas habilidades a nivel laboral y organizacional, así también se buscó investigar cuáles son las habilidades blandas en el entorno laboral, a través de un método de investigación descriptivo y transversal. Los resultados más destacados fueron que se detectaron falencias en las competencias: trabajar bajo presión, trabajar en equipo y creatividad.

Para evaluar la adquisición de competencias genéricas resulta imprescindible contar con los requerimientos del mercado laboral y la percepción de los estudiantes avanzados y graduados sobre

su performance. Los requerimientos del mercado laboral se han relevado por el CONFEDI y plasmados en una resolución ministerial, fijando las competencias necesarias (Ministerio de Educación, 2021). En cuanto a la percepción de los estudiantes avanzados y los graduados sobre nivel de adquisición no existen estudios previos en nuestra Institución.

Por este motivo, partiendo de la problemática expresada de la necesidad de conocer si se perciben conformes con su formación respecto a los requerimientos del mercado laboral, este artículo tiene como objetivo contrastar las percepciones entre dos grupos bien definidos. Estudiantes avanzados junto con graduados recientes (menos de un año) y Graduados de hasta 5 años de recibidos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata (FI-UNMdP).

Para medir el impacto en la formación por competencias de ambos grupos, se analiza la percepción de tres expectativas en relación a competencias mediante dos indicadores. Las competencias relevadas son de distintos tipos: tecnológicas, sociales, políticas y actitudinales. Se observa el grado en que las dos muestras las adquirieron, las esperaban adquirir al terminar la carrera y lo requerido por las organizaciones.

## 2. MARCO TEÓRICO

En esta publicación se consideran tres elementos fundamentales, las percepciones, las competencias y los indicadores. Las percepciones tienen varios significados, Carterette y Friedman (1982) las definen como el resultado de un procesamiento de información que consta de estimulaciones a receptores en condiciones que en cada caso se deben parcialmente a la propia actividad consciente del sujeto. Moya (citado en Arias Castilla, 2006), expone que en las percepciones se involucran sentimientos, pensamientos y conductas respecto a las personas o sucesos y que estarán mediatizados por el tipo de causa a la que se atribuya su conducta. En esta investigación, es fundamental cómo ambos grupos en análisis perciben las competencias que esperaban adquirir, las competencias que adquirieron y las competencias que les han sido demandadas al insertarse laboralmente.

En cuanto a las definiciones de competencias son muy variadas e involucran diferentes aspectos, sin embargo, se podría tomar como posicionamiento teórico la enunciada por el CONFEDI (2006), que las describe como la capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas (estructuras mentales) y valores, permitiendo movilizar distintos saberes, en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales.

Respecto a los indicadores, en el campo de la investigación, un indicador es un elemento observable o medible y proporciona información cuantitativa o cualitativa sobre una variable o dimensión de estudio. Los indicadores ayudan a traducir conceptos abstractos a datos concretos para su análisis y evaluación en el contexto de una investigación. Hernández Sampieri (2014) sostiene que es adecuado definir la medición como el proceso de vincular conceptos abstractos con indicadores empíricos, el cual se realiza mediante un plan explícito y organizado para clasificar (y frecuentemente cuantificar) los datos disponibles (los indicadores), en términos del concepto que el investigador tiene en mente. Para este artículo se toman dos indicadores (Comoglio, et al., 2018) que miden la relación percibida entre lo adquirido, lo esperado y lo percibido por los estudiantes y graduados durante la experiencia laboral respecto a las dimensiones analizadas.

En base a estos constructos teóricos se diseña la metodología de trabajo utilizada.

## 3. METODOLOGÍA.

Como tipo de investigación se establece una combinación de diseño exploratorio y descriptivo, dado que intenta indagar el estado de una cuestión de la realidad que es desconocida y el objetivo principal es tener datos de fuente primaria que den cuenta de la problemática estudiada. Se parte de datos relevados sobre dos muestras para poder conocer y comparar sus percepciones y expectativas. La población ($N_1$=168) correspondiente a “estudiantes avanzados junto con graduados recientes (menos de un año)” fue indagada en noviembre del año 2024. Respecto a la población ($N_2$=572) de “graduados de hasta 5 años de recibidos” (2018-2022) se consulta en mayo del año 2023. Ambos grupos cursan o cursaron las carreras con planes de estudio 2003 que fueron gestados con un criterio diferente al modelo centrado en el estudiante y basado en competencias.

Se aplica un cuestionario que es autoadministrado, a través de un formulario en línea, el mismo es estructurado con opción de respuesta múltiple y utiliza una escala tipo Likert de 1 a 10 puntos, que va

desde “no estoy de acuerdo” a “estoy totalmente de acuerdo” para medir expectativas. El mismo presenta 17 preguntas (denominadas ítems en la Tabla 1) que indagan sobre tres grupos de expectativas: el grado que ha adquirido de la competencia en la carrera; el grado que esperaba adquirir de la competencia en la carrera; y el grado requerido de la competencia en la actividad laboral.

La muestra de la población $N_1$ (168) se compone de 53 personas ($n_1$) que respondieron el cuestionario, entre estudiantes avanzados y graduados de todas las carreras y un nivel de confianza 95% se obtiene un margen de error de 11%. En cuanto a la muestra de la población $N_2$ se compone de 108 individuos ($n_2$) y considerando la población de 572 ingenieros y un nivel de confianza 95% se obtiene un margen de error de 9%.

El enfoque de la investigación es mixto, dado que por la naturaleza de los datos y los métodos utilizados se vale de estrategias cualitativas y cuantitativas. Este abordaje no tiene hipótesis, como otros estudios exploratorios, ya que el objetivo es precisamente explorar un tema que se desconoce y está en proceso de evolución.

Se estudian dimensiones correspondientes a competencias genéricas técnicas y sociales definidas como: Competencia para identificar, formular y resolver problemas de ingeniería; Competencia para desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo; Competencia para comunicarse con efectividad; y Competencia para aprender en forma continua y autónoma. Las competencias analizadas se describen en la Tabla 1, para su análisis se desagrega en ítems que son utilizados para la confección del cuestionario como se ha mencionado.

*Tabla 1 Dimensiones analizadas*

| *Dimensiones analizadas* | | |
|---|---|---|
| **Competencia medida** | **Capacidad asociada** | **Ítems** |
| **IDENTIFICAR, FORMULAR Y RESOLVER PROBLEMAS DE INGENIERÍA** | Capacidad para identificar y formular problemas | Ser capaz de identificar una situación problemática |
| | | Ser capaz de identificar y organizar los datos pertinentes a la situación problemática |
| | | Ser capaz de evaluar el contexto particular del problema e incluirlo en el análisis |
| | | Ser capaz de delimitar el problema y formularlo de manera clara y precisa |
| | Capacidad para implementar tecnológicamente una alternativa de solución | Ser capaz de realizar el diseño de la solución tecnológica para resolver un problema |
| | | Ser capaz de incorporar al diseño de la solución tecnológica las dimensiones del problema (tecnológica, temporal, económica, entre otras) que sean relevantes en su contexto específico |
| | | Ser capaz de planificar la resolución del problema (identificar el momento oportuno, estimar los tiempos, prever los recursos necesarios, entre otros) |
| | | Ser capaz de optimizar la solución y uso de los materiales y/o dispositivos tecnológicos disponibles para la implementación de la solución tecnológica |
| | | Ser capaz de elaborar informes, planos, especificaciones y comunicar recomendaciones |
| | | Ser capaz de controlar el proceso de ejecución del proyecto de ingeniería |

| | | |
|---|---|---|
| **DESEMPEÑARSE DE MANERA EFECTIVA EN EQUIPOS DE TRABAJO** | Capacidad para trabajar en equipo | Ser capaz de reconocer y respetar los puntos de vista y opiniones de otros miembros del equipo y llegar a acuerdos |
| | | Ser capaz de identificar las metas y responsabilidades individuales y colectivas en un grupo de trabajo y actuar de acuerdo a ellas |
| | | Ser capaz de asumir responsabilidades y roles dentro del equipo de trabajo |
| **COMUNICARSE CON EFECTIVIDAD** | Capacidad para la comunicación efectiva | Ser capaz de seleccionar las estrategias de comunicación en función de los objetivos y de los interlocutores y acordar significados en el contexto de intercambio |
| | | Ser capaz de producir e interpretar textos técnicos (procedimientos, informes, entre otros) y presentaciones públicas |
| **APRENDER EN FORMA CONTINUA Y AUTÓNOMA** | Capacidad para el aprendizaje | Ser capaz de reconocer la necesidad de un aprendizaje continuo y actualización permanente a través formación |
| | | Ser capaz de lograr autonomía en el aprendizaje |

Para el análisis de los datos relevados se calculan y procesan dos indicadores a través de una planilla Excel que, como se mencionó, miden la relación percibida entre lo adquirido, lo esperado y lo recibido por los estudiantes y graduados durante la experiencia laboral respecto a las dimensiones analizadas. Además, se utilizan elementos de estadística descriptiva como el promedio y los gráficos radar.

Los indicadores se han adoptado del grupo de investigación del Instituto de Investigaciones en Tecnología y Educación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (Comoglio, et al., 2018) y se definen como:

Indicador de Adecuación de la Competencia (IAC) = Valor Observado (VO) - Valor Esperado (VE) (1)

Indicador de Desarrollo de la Competencia (IDC) = Valor Observado (VO) - Valor Requerido (VR) (2)

Dónde:

Valor Observado (VO) es el grado que adquiriste de la competencia durante el avance en la carrera.

Valor Esperado (VE) es el grado que esperabas adquirir de la competencia durante el avance en la carrera.

Valor Requerido (VR) es el grado requerido de la competencia durante la experiencia pre o profesional.

Para cada valor relevado (VO, VE y VR) del ítem se realiza el promedio de las respuestas de los estudiantes y graduados y luego se calculan los indicadores IAC e IDC mediante las fórmulas (1) y (2), respectivamente, para cada ítem de una competencia. Posteriormente se promedian los IAC y IDC de los ítems asociados para obtener el indicador propio de la competencia. Para la competencia Identificar, Formular y Resolver problemas de ingeniería, que se mide a través de dos capacidades, se calculan los promedios de cada capacidad (Promedio a y Promedio b) y luego se promedian ambos valores para obtener los indicadores de desarrollo de dicha competencia.

## 4. RESULTADOS.

En la Tabla 2 se presentan los indicadores resultantes de aplicar la metodología expuesta en el punto anterior.

*Tabla 2 Indicadores resultantes*

| ***Indicadores resultantes*** | | **Estudiantes avanzados y graduados recientes** | | **Graduados hasta 5 años** | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Capacidad asociada** | **Ítems** | **$n_1$** | | **$n_2$** | |
| | | **IAC** | **IDC** | **IAC** | **IDC** |
| **Capacidad para identificar y formular problemas** | Ser capaz de identificar una situación problemática | -0.34 | 0.06 | -0.82 | -0.62 |
| | Ser capaz de identificar y organizar los datos pertinentes a la situación problemática | -0.13 | 0.11 | -1.02 | -1.13 |
| | Ser capaz de evaluar el contexto particular del problema e incluirlo en el análisis | -0.30 | -0.38 | -1.03 | -1.19 |
| | Ser capaz de delimitar el problema y formularlo de manera clara y precisa | -0.51 | -0.36 | -0.90 | -1.09 |
| | **Promedio a** | **-0.32** | **-0.14** | **-0.94** | **-1.01** |
| **Capacidad para implementar tecnológicamente una alternativa de solución** | Ser capaz de realizar el diseño de la solución tecnológica para resolver un problema | -1.60 | -0.75 | -1.97 | -1.47 |
| | Ser capaz de incorporar al diseño de la solución tecnológica las dimensiones del problema (tecnológica, temporal, económica, entre otras) que sean relevantes en su contexto específico | -0.51 | -0.45 | -1.65 | -1.56 |
| | Ser capaz de planificar la resolución del problema (identificar el momento oportuno, estimar los tiempos, prever los recursos necesarios, entre otros) | -0.98 | -1.09 | -1.48 | -1.93 |
| | Ser capaz de optimizar la solución y uso de los materiales y/o dispositivos tecnológicos disponibles para la implementación de la solución tecnológica | -0.66 | -0.64 | -1.24 | -1.39 |
| | Ser capaz de elaborar informes, planos, especificaciones y comunicar recomendaciones | -0.32 | -0.09 | -0.84 | -0.78 |
| | Ser capaz de controlar el proceso de ejecución del proyecto de ingeniería | -1.36 | -0.89 | -1.49 | -1.79 |
| | **Promedio b** | **-0.90** | **-0.65** | **-1.45** | **-1.49** |
| | **Promedio de a y b** | **-0.61** | **-0.40** | **-1.19** | **-1.25** |
| **Capacidad para trabajar en equipo** | Ser capaz de reconocer y respetar los puntos de vista y opiniones de otros miembros del equipo y llegar a acuerdos | 0.17 | -0.191 | -0.14 | -0.64 |
| | Ser capaz de identificar las metas y responsabilidades individuales y colectivas en un grupo de trabajo y actuar de acuerdo con ellas | 0.23 | -0.19 | -0.53 | -1.22 |
| | Ser capaz de asumir responsabilidades y roles dentro del equipo de trabajo | 0.06 | -0.06 | -0.24 | -0.81 |
| | **Promedio** | **0.16** | **-0.13** | **-0.30** | **-0.89** |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Capacidad para la comunicación efectiva** | Ser capaz de seleccionar las estrategias de comunicación en función de los objetivos y de los interlocutores y acordar significados en el contexto de intercambio | -0.02 | -0.40 | -0.87 | -1.94 |
| | Ser capaz de producir e interpretar textos técnicos (procedimientos, informes, entre otros) y presentaciones públicas | -0.13 | 0.23 | -0.34 | -0.21 |
| | **Promedio** | **-0.07** | **-0.09** | **-0.61** | **-1.08** |
| **Capacidad para el aprendizaje** | Ser capaz de reconocer la necesidad de un aprendizaje continuo y actualización permanente a través formación | 0.38 | 0.51 | -0.06 | -0.41 |
| | Ser capaz de lograr autonomía en el aprendizaje | 0.21 | 0.30 | 0.10 | -0.25 |
| | **Promedio** | **0.30** | **0.40** | **0.02** | **-0.33** |

Para introducir al análisis de los datos, cabe aclarar que el indicador IAC evalúa la satisfacción de las muestras durante su proceso de formación, es decir calcula en qué medida las expectativas fueron satisfechas a través de las actividades formativas desarrolladas en los distintos espacios curriculares (Comoglio et al., 2018 p. 3). En el caso en que el IAC sea positivo (>0) implica que la muestra tiene una percepción de haber superado sus expectativas con respecto a la adquisición de la competencia estudiada. De lo contrario, que el IAC sea negativo (<0) denota que los estudiantes o graduados consideran que no se han cumplido sus expectativas con respecto a su formación. Si el IAC fuera nulo (=0) significa que han adquirido exactamente lo que esperaban en relación con la competencia. Por su parte el indicador IDC mide de manera indirecta la satisfacción de los empleadores respecto al desempeño de los colaboradores y se aplica el mismo criterio que con el indicador IAC respecto a un resultado positivo, negativo o nulo.

Para el siguiente análisis se presentan las capacidades asociadas a las 4 competencias estudiadas, las cuales serán comparadas según los índices IAC y IDC para ambas muestras.

- Competencia de “Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería”

Está competencia formada por dos dimensiones: Capacidad para Identificar y formular problemas y Capacidad para implementar tecnológicamente una alternativa de solución.

Para ambas dimensiones, los datos resultantes del IAC e IDC son negativos para ambas muestras. Se puede apreciar una diferencia significativa en cuanto a los valores de los indicadores entre $n_1$ y $n_2$, dado que para la primera muestra el IAC e IDC son mejores que para la segunda muestra. Esto podría deberse a que los graduados con más tiempo en el mercado laboral perciben de modo más crítico su performance según los requerimientos de sus empleadores.

- Competencia de “Desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo”

Al observar los índices de la Capacidad para trabajar en equipo, los valores son diferentes para el IAC dado que es positivo para $n_1$ y negativo para $n_2$, lo que implicaría que en el primer caso la muestra se percibe satisfecha en relación a sus expectativas en cambio en el segundo caso, no alcanza a cumplir con lo que percibe respecto a su formación. Para el IDC ambas muestras tienen valores negativos, aunque para $n_1$ es mejor que para $n_2$, esta tendencia se repite como en la competencia anterior.

- Competencia de “Comunicarse con efectividad”

Para esta competencia se toma la única capacidad implicada dada por Comunicarse con efectividad, los valores de IAC e IDC de la muestra $n_1$ son negativos pero son cercanos al 0, significa que se ha adquirido o requerido, prácticamente lo necesario según su expectativa. Para el $n_2$, el IAC e IDC son negativos lo que muestra que se perciben insatisfechos respecto a lo adquirido y lo requerido.

- Competencia de “Aprender en forma continua y autónoma”

La Capacidad para el aprendizaje para $n_1$ da valores positivos de ambos indicadores, esto muestra tanto lo adquirido como lo requerido ha satisfecho sus expectativas. En el caso de $n_2$ el IAC es positivo y casi nulo y el IDC es negativo. Esto indicaría que lo adquirido es apenas lo esperado y menos de lo requerido.

En las figuras 1 y 2 se presentan diagramas de radar que comparan los indicadores IAC y IDC de ambas muestras para las cuatro competencias.

En ambos casos, a través de otra perspectiva de análisis donde se pone en la magnitud de los indicadores, se puede visualizar que para el grupo de estudiantes avanzados y recién recibidos los valores de IAC e IDC son mayores que para el grupo de graduados hasta 5 años de graduados. Lo que estaría mostrando que los profesionales más experimentados no están tan conformes con su performance y/o que no han podido dar respuesta a lo que sus empleadores les han solicitado.

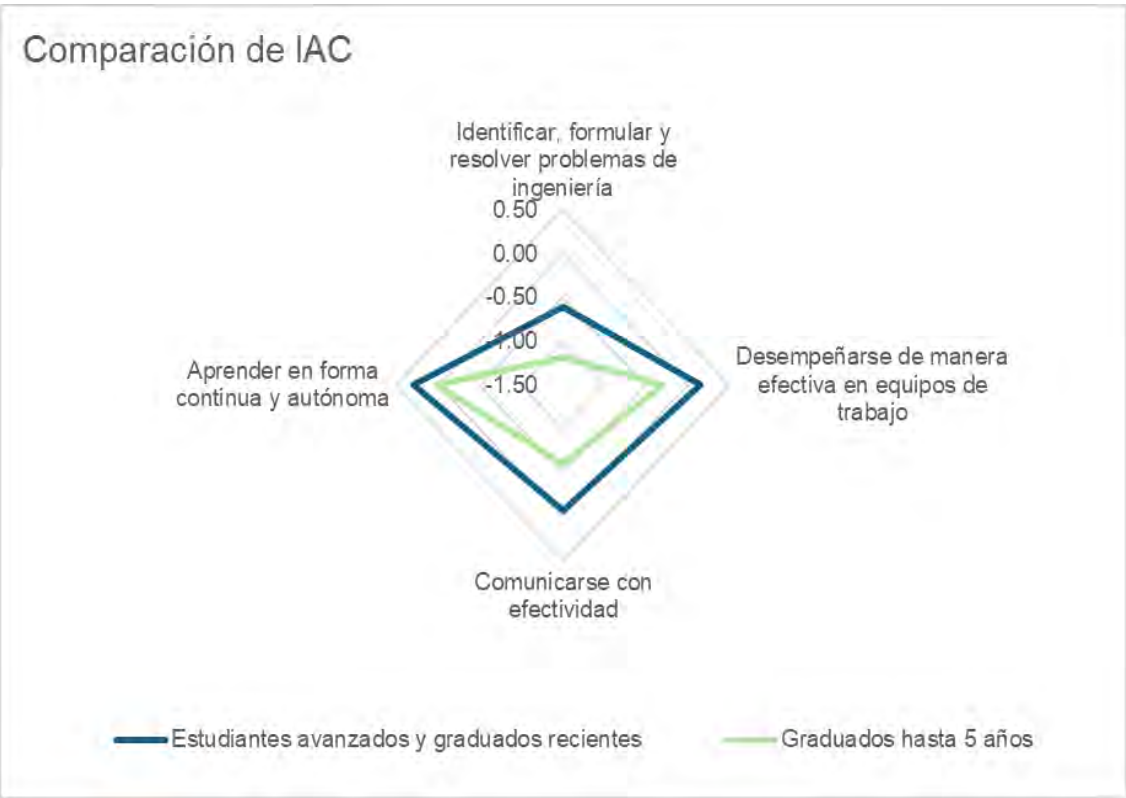



*Figura 1 Comparación de los indicadores de adquisición de la competencia para ambas muestras.*

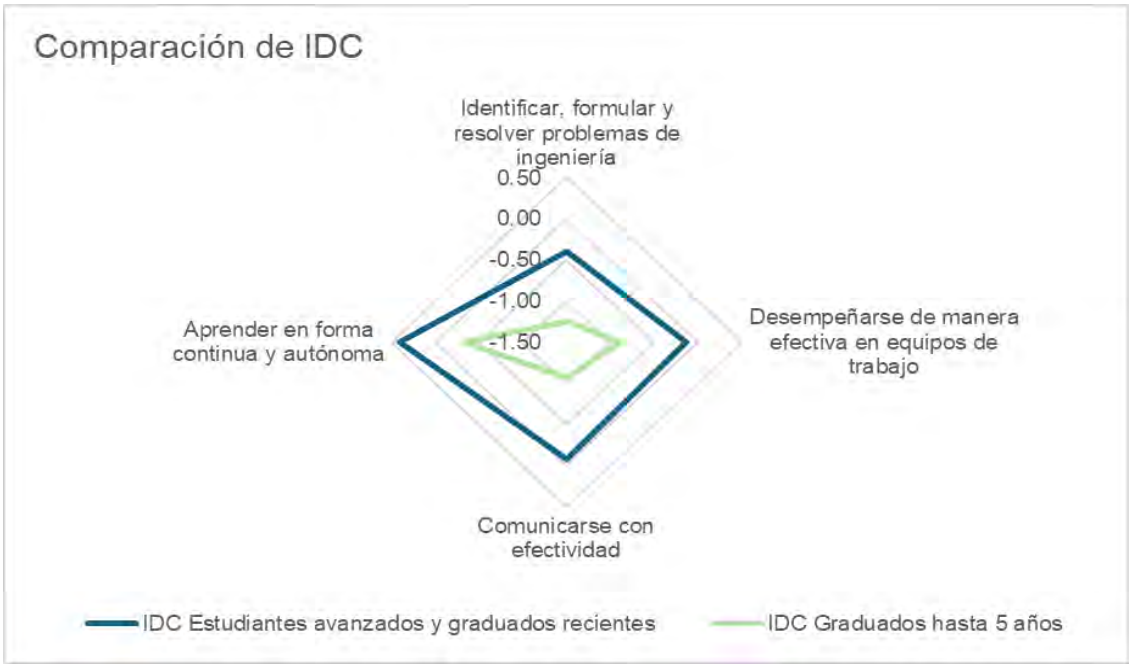



*Figura 2 Comparación de los indicadores de desarrollo de la competencia para ambas muestras.*

## 5. CONCLUSIONES.

En general los resultados muestran que las cuatro competencias tienen un comportamiento similar y sugieren al observar los IAC que ambos grupos tienen altas expectativas sobre su formación, esto se puede deber a la creencia de que se les exigirá un alto rendimiento desde el inicio de su vida laboral.

Al comparar, la primera muestra (graduados más recientes) presenta un mejor IDC que la segunda muestra (graduados con más tiempo en el mercado laboral), una explicación posible está dada porque los ingenieros con más experiencia perciben su desempeño de manera más crítica en función de las exigencias de sus empleadores.

El hecho de que los graduados de hasta 5 años tengan percepciones más negativas que los estudiantes avanzados y graduados recientes podría deberse a que el primer grupo está más alejado de su perfil como estudiante, y que en su vida laboral han dejado de ser jóvenes profesionales y por tanto se espera de ellos otro nivel de resultados.

Finalmente, con los datos se ha logrado contar con información significativa para monitorear la implementación de los nuevos planes de estudio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Por ello, se espera repetir este estudio dentro de dos años cuando se gradúe la primera cohorte.

## 6. REFERENCIAS.


Arias Castilla, C.A. (2006). Enfoques teóricos sobre la percepción que tienen las personas. *Horizonte Pedagógico.* 8, (1), 9 – 22.

Artigas, M. V.; Santille, L. S. y Onaine, A. E. (2023). Trazabilidad de competencias en jóvenes profesionales de ingeniería. Anuario de Investigaciones en Psicología, XXX, 51-57 https://www.psi.uba.ar/publicaciones/anuario/trabajos_completos/30/artigas.pdf

Bejarano, G. Panica,C. y Garay L. (2022). Caracterización de habilidades blandas en estudiantes de Ingeniería en Informática de la UCSE-DASS. Revista Difusiones, ISSN 2314-1662, Num. 23, 2(2) julio-diciembre 2022, 30-47.

Carterette, E. y Friedman, M. (1982). Manual de Percepción: Raíces. Históricas y Flosóficas. Editorial Trillas.

Documento del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la República Argentina. (2006). Primer Acuerdo sobre Competencias Genéricas. CONFEDI.

Comoglio, M. S.; Minnaard, C. L., Morrongiello, N. y Pascal, G. (16 al 18 de mayo de 2018). Formación por competencias en carreras de ingeniería. Indicadores para evaluar su nivel de adquisición. VI Jornadas Nacionales y II Latinoamericanas de Ingreso y Permanencia en Carreras Científico-Tecnológicas, Olavarría, Buenos Aires, Argentina. https://digital.cic.gba.gob.ar/items/1f471423-bd5f-4c9c-a5fd-f902964d7be2

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación. Ed. Mc.Graw Hill España. España.

Holguín, M. G., Tavera, A. F. y López, M. B. (2018). Desarrollo de habilidades blandas y el uso del Sistema de Gestión del Aprendizaje en la elaboración de proyectos prácticos en una asignatura introductoria de Ingeniería Telemática. Cuaderno de Pedagogía Universitaria, 15(29), 44-53.

Liseyka, J. y Nicholson A. (2021). Análisis acerca de los jóvenes universitarios de ingeniería y su percepción sobre las competencias blandas en la ciudad de Panamá. Revista Especializada de Ingeniería y Ciencias de la Tierra, Universidad de Panamá, 1 (2), 1/6, 35, 2022. https://revistas.up.ac.pa/index.php/REICT

Marzo Navarro, M., Pedraja Iglesias, M. y Rivera Torres, P. (2006). Las competencias profesionales demandadas por las empresas: el caso de los ingenieros. Universidad de Zaragoza. Revista de Educación, 341 (9-12), 643-661.

Neri Torres, J. C. y Hernández Herrera, C. A. (2019). Los jóvenes universitarios de ingeniería y su percepción sobre las competencias blandas. Revista Iberoamericana para la Investigación y el desarrollo educativo (Ride), 9, 18 (1-6), 3-24 DOI: 10.23913/ride.v9i18.445 p3-24

Paoloni, P.V., Chiecher, A.C. and Elisondo, R.C., (2019). Graduados de ingeniería y competencias genéricas. Cinco estudios de la última década que recuperan sus valoraciones y experiencias. Educación en Ingeniería, 14(28), 54-64, Marzo - Julio de 2019.

Resolución 1543 de 2021. Documento de Estándares de Aplicación General para la Acreditación de Carreras de Grado. 18 de mayo de 2021. RESOL-2021-1543-APN-ME.

Schmal, S. y Rodolfo, S. (2012). Reflexiones en torno a un programa para la formación de competencias transversales en ingeniería. Ciencia, Docencia y Tecnología, XXIII, (44), 5 239-262.

Zachman, P. Fernández, C., Saucedo, A. , Fogar, R. (2024). Percepciones de los graduados respecto de la formación de competencias en Ingeniería en Sistemas de Información. en 7° Congreso Argentino de Ingeniería y 13° Congreso Argentino de Enseñanza de Ingeniería (CADI-CAEDI 4,5,6 de septiembre de 2024), San Juan, Provincia de San Juan, Argentina. En prensa. https://cadicaedi.fi.unsj.edu.ar/wp-content/uploads/2024/08/CAEDI-ENS-ID-61-Zachman-Percepciones-de-los-graduados-en-formacion-de-competencias-en-Ingenier-Articulo-Breve.pdf

**Agradecimientos**

Los autores desean agradecer a los estudiantes y graduados que hicieron posible la realización de este trabajo que entendemos servirá de insumo para la mejora contínua de los planes de estudio de las carreras de ingeniería de nuestra Unidad Académica.



# Eje 6
# Trabajos de Cátedra Estudiantiles




# COMPROMISO SOCIAL DE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL Y TRIPLE IMPACTO EN EL CORREDOR RAMALLO – SAN NICOLÁS – VILLA CONSTITUCIÓN

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – FACULTAD REGIONAL SAN NICOLÁS**

**Autoras: Cacciavillani, Giuliana M.; Parra, Pamela; Pedoto, Narela A.**

## Introducción

La Ingeniería Industrial es una profesión de gran relevancia en el desarrollo económico y social, ya que se encuentra en permanente interacción con múltiples sectores productivos y de servicios. Tradicionalmente, su rol estuvo asociado a la mejora de la productividad, la reducción de costos y la eficiencia de los procesos. Sin embargo, en la actualidad, el desafío para la profesión es no limitarse a los objetivos clásicos: se espera que el ingeniero industrial contribuya también al bienestar de las comunidades y la preservación del medio ambiente.

Este nuevo modelo se enmarca en el concepto de triple impacto, un concepto que ha ganado terreno en el ámbito empresarial y académico que plantea que las organizaciones no deben medir su éxito únicamente en términos económicos, sino también en función de su aporte a la sociedad y al cuidado del ambiente. dos dimensiones igualmente críticas. Las empresas de triple impacto buscan armonizar estos tres pilares, demostrando que es posible generar valor económico de forma ética y sostenible, sin comprometer el capital humano ni los recursos naturales.

En 2023, la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Nicolás (UTN FRSN) actualizó el plan de estudios de Ingeniería Industrial incorporando competencias vinculadas a la sustentabilidad, la ética profesional y el liderazgo colaborativo. Este cambio no es menor; se trata de una respuesta a la demanda de profesionales capaces de aportar a empresa con orientación de triple impacto.

La región del corredor industrial Ramallo - San Nicolás - Villa Constitución, se caracteriza por la fuerte presencia de la siderurgia, la agroindustria y la logística portuaria. Mediante este trabajo se analizará cómo las competencias adquiridas por los ingenieros industriales en el nuevo plan pueden contribuir al compromiso social de la profesión y al desarrollo de empresas con orientación de triple impacto.

## El triple impacto

El enfoque de triple impacto implica una evolución fundamental en la visión empresarial que reconoce que la rentabilidad económica por sí sola no asegura un desarrollo sostenible. Una organización de triple impacto propone que el valor debe ser medido y gestionado simultáneamente tres dimensiones:

- Económico: la dimensión económica va más allá de la generación de ingresos y la reducción de costos, el enfoque se expande hacia la eficiencia en el uso de los recursos y la competitividad a largo plazo a través de la innovación sostenible logrando la generación de valor, productividad y competitividad.
- Social: se centra en la relación de positiva de la organización con trabajadores, comunidades y sociedad en general.
- Ambiental: La meta es minimizar la huella ecológica de la organización a través de prácticas como protección del entorno natural, eficiencia energética, reducción de emisiones, gestión responsable de residuos y economía circular.

Este enfoque está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU y marcos internacionales como la ISO 26000 (responsabilidad social) y la ISO 14001 (gestión ambiental) ofrecen directrices y estándares para integrar y auditar estas prácticas. Para las empresas, implica adoptar una perspectiva de triple impacto, transformar la lógica del negocio, repensar los procesos, las cadenas de valor y las decisiones estratégicas de las organizaciones.

En consecuencia, el ingeniero industrial no puede limitarse a ser un “optimizador de procesos”, sino que debe convertirse en un agente de cambio que integra estas dimensiones en los sistemas productivos.

## Nuevas competencias del ingeniero industrial

El nuevo plan de estudios de la Universidad Tecnológica Nacional refleja esta transformación en su perfil de egreso, incorporando competencias que complementan la formación técnica tradicional:

- **Pensamiento sistémico:** comprender la interacción entre lo económico, lo social y lo ambiental en un mismo sistema productivo.
- **Gestión ambiental y sustentabilidad:** uso de indicadores ambientales, eco eficiencia y análisis de ciclo de vida.
- **Ética y compromiso social:** toma de decisiones considerando el impacto sobre trabajadores, comunidades y generaciones futuras.
- **Liderazgo colaborativo:** capacidad de integrar equipos interdisciplinarios y dialogar con actores públicos, privados y comunitarios.
- **Innovación y mejora continua:** generación de soluciones tecnológicas y organizacionales que aporten a la sostenibilidad.
- **Comunicación efectiva:** habilidades para transmitir resultados y propuestas de valor a empresas, ONG, organismos públicos y sociedad civil.

Estas competencias transforman al ingeniero industrial en un profesional capaz de ser nexo entre universidad, empresas y comunidad, contribuyendo activamente a proyectos de desarrollo sostenible.

## Campos de aplicación en la región

El corredor industrial de esta región Ramallo - San Nicolás - Villa Constitución ofrece un amplio campo de aplicación para las competencias del nuevo plan:

- Siderurgia y metalmecánica:
    - Relevancia en San Nicolás y Villa Constitución.
    - Necesidad de ingenieros que trabajen en eficiencia energética, reducción de emisiones y programas de seguridad laboral, gestión de residuos industriales.

- Potencial para aplicar economía circular en la reutilización de subproductos y fomentar la seguridad laboral.

- Agroindustria y logística portuaria:
  - Presencia de plantas de procesamiento de granos y aceites, junto a puertos sobre el río Paraná.
  - Desafíos en la trazabilidad de la cadena de valor, optimización logística y reducción de huella ambiental.
  - Oportunidad de diseñar cadenas sostenibles que integren proveedores, empresas y comunidades rurales.
- Servicios y sector público:
  - Municipios y cooperativas de servicios en la zona demandan procesos más eficientes y transparentes.
  - Aplicar metodologías de calidad, digitalización y gestión con impacto social directo.

En todos estos ámbitos, el ingeniero industrial puede convertirse en protagonista de transformaciones que articulen productividad, competitividad, el bienestar social y la sustentabilidad ambiental.

## Grandes empresas y pymes: dos realidades complementarias

Un aspecto clave en la región es la coexistencia de grandes industrias y una amplia red de pymes, lo que plantea diferentes escenarios para la acción profesional

- **Grandes empresas:** suelen contar con áreas de sustentabilidad, programas de responsabilidad social empresarial y reportes de sostenibilidad. El ingeniero industrial puede colaborar en el diseño de indicadores de triple impacto, en la optimización energética y en la vinculación con las comunidades locales.
- **Pymes:** muchas veces carecen de estructuras formales, pero poseen flexibilidad y cercanía con las comunidades. Aquí, el ingeniero puede desempeñar un rol clave proponiendo proyectos de bajo costo, pero alto impacto, como la reducción de residuos, el uso de energías renovables o la mejora de procesos administrativos.

Esta complementariedad es una oportunidad para que los ingenieros industriales de la UTN San Nicolás encuentren distintos espacios de inserción profesional, aportando siempre con la mirada del triple impacto.

## Rol social de la UTN y vinculación con el entorno

La universidad desempeña un papel central en la conexión entre la formación académica y el desarrollo regional. Algunas estrategias destacadas son:

- Pasantías y proyectos finales de carrera orientados a problemas reales de la industria local.
- Convenios con municipios y ONG para que estudiantes y egresados aporten soluciones de impacto social y ambiental.
- Capacitación continua para profesionales en gestión de triple impacto y responsabilidad social empresarial.

De este modo, la universidad no solo forma ingenieros competentes, sino que también contribuye directamente al desarrollo sostenible de la región.

## Conclusiones

El compromiso social de la Ingeniería Industrial se ha vuelto un requisito indispensable para responder a los nuevos desafíos. La incorporación de la perspectiva de triple impacto—económico, social y ambiental—en el nuevo plan de estudios no es únicamente una actualización curricular, sino una redefinición estratégica del rol del ingeniero. El nuevo plan de estudios es un ejemplo de cómo la universidad se adapta, incorporando competencias que permiten a los ingenieros contribuir activamente al triple impacto contando con las herramientas y la conciencia necesarias para abordar los desafíos complejos que demanda la sostenibilidad.

En la región de Ramallo – San Nicolás – Villa Constitución, los sectores de siderurgia, agroindustria y logística ofrecen un ámbito propicio para aplicar estas competencias, generando beneficios económicos, sociales y ambientales. Tanto en grandes empresas como

en pymes, el ingeniero industrial puede aportar soluciones innovadoras que potencien la sostenibilidad de los procesos, fortalezcan la competitividad y el vínculo con las comunidades.

Las empresas, por su parte, deben asumir nuevos roles, adoptando modelos de economía circular, establecer mecanismos de participación comunitaria y generando indicadores de sostenibilidad verificables.

Así, la Ingeniería Industrial podrá consolidarse como una profesión que no solo optimiza recursos, sino que también impulsa un desarrollo regional equitativo, innovador y sostenible.

## Bibliografía


Organización de las Naciones Unidas. (s.f.). Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU para triple impacto. Disponible en: https://www.un.org/desarrollosustentable/es

International Organization for Standardization. (s.f.). Normas de gestión ISO 26000 y 14001 que promueven la responsabilidad social y ambiental en las organizaciones. Disponible en: https://www.iso.org/standards.html

Universidad Tecnológica Nacional. (2024). Transformación del rol del ingeniero industrial: Evolución del perfil profesional incorporando competencias como sostenibilidad, ética profesional, liderazgo y trabajo en equipo, comunicación efectiva, que permiten abordar los tres pilares del triple impacto. Marco reglamentario. Disponible en: https://www.frsn.utn.edu.ar/?page_id=523

Universidad Tecnológica Nacional. (2024). Planes de estudio y diseño curricular del Ingeniero Industrial. Disponible en: https://www.frsn.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2024/08/Plan-de-estudio-Ing-Industrial.pdf

Universidad Tecnológica Nacional. (2024). Disposición curricular del Ingeniería Industrial. Disponible en: https://www.frsn.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2024/08/Ord-1908-Diseno-Curricular-Ing.-Industrial.pdf

Universidad Tecnológica Nacional. (2024). Reglamento de correlativas. Disponible en: https://www.frsn.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2024/08/Ord-1909-Regimen-de-correlativas-1.pdf

Gobierno de Argentina. (1999). Plan estratégico de San Nicolás. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/plan_estrategico_de_san_nicolas.pdf?utm




# “Liderazgo y cultura organizacional como palancas de productividad en una empresa troqueladora”

## Autores:

Julián Karkaletsis

Nina Bialolenkier

## Tema:

“Liderazgo y Cultura Organizacional como ejes de una estrategia empresarial exitosa”

## Carrera/Universidad:

Ingeniería Industrial - Universidad de Belgrano – Facultad de Ingeniería y Tecnología Informática

**Año 2025**

# Introducción

## Cultura y liderazgo

Este estudio se desarrolla en el marco de una PyME industrial en Argentina dedicada a la fabricación de cajas de diferentes materiales. Se aborda un desafío típico del sector: elevar la eficiencia operativa, y al mismo tiempo, fortalecer el compromiso y la satisfacción de las personas en contextos de recursos limitados.

Se sostiene que tanto el liderazgo como la cultura organizacional no son "intangibles blandos", sino palancas para el desempeño. Diferentes estudios muestran que las prácticas de gestión explican marcadas diferencias de productividad entre firmas y países, y que los rasgos culturales (misión, consistencia, adaptabilidad, involucramiento del capital humano en las gestiones operativas) se asocian con la efectividad organizacional. (Bloom, N., & Van Reenen, J., 2007).

Se entiende a la cultura organizacional como el patrón de normas y supuestos que definen y dan la pauta de qué es lo que se debe priorizar y cómo decidirlo; por otro lado, el liderazgo es aquel mecanismo que crea y refuerza esa cultura. Este tipo de mirada es la que propone Schein, E. H. 2010 (referente en estos tópicos), quien describe los mecanismos primarios y secundarios utilizados por los líderes para definir rutinas, tiempos de respuesta y aprendizaje organizacional. En clave de ensayo, se toman estos mecanismos como hipótesis de lectura, donde lo que el liderazgo atiente, mide y reconoce instala hábitos y expectativas que condicionan la ejecución operativa.

Como referencia, se toma el modelo de Denison, D. R., & Mishra, A. K. 1995, marco para medir y gestionar la cultura organizacional a partir de definiciones concretas, que organiza la cultura en cuatro rasgos: Misión, Adaptabilidad, Consistencia e Involucramiento. De esta forma, se asocian estos conceptos con resultados traducidos a conductas observables. Estas dimensiones se utilizan como criterios de análisis del caso, especialmente Consistencia e Involucramiento, para vincular valores, rutinas y resultados.

El desafío está en discutir cómo liderazgo y cultura organizacional son uno de los pilares a centralizar para lograr mejoras operativas en contextos de recursos limitados, especialmente cuando se combina con digitalización de bajo costo en busca de la optimización del sistema de gestión y control de la producción.

Este ensayo articula el caso según Shein (2010) y Denison & Mishra (1995), sosteniendo que las mejoras productivas se explican por comportamientos, significados compartidos y rutinas que los líderes instauran y que el equipo adopta. También se consideran hallazgos que vinculan

prácticas de gestión, donde se busca mostrar de qué manera el liderazgo y la cultura organizacional actúan como palancas de productividad en una empresa troqueladora argentina.

# Desarrollo

### Situación de la empresa troqueladora a impactar

En el marco de la empresa troqueladora donde se focaliza el estudio de liderazgo y cultura organizacional, se reconocen diferentes problemáticas a trabajar: en primer lugar, la priorización de la producción se realiza en base a la urgencia diaria, sin contar con una mirada a mediano plazo, lo que lleva a la generación de cuellos de botella, reprocesos y alta presión en planta.

Por otro lado, los registros manuales, escritos en papel a mano y luego manualmente en una planilla en MS Excel, generan entradas dispersas e islas de información, lo que lleva a falta de información del estado de la materia prima y de la producción terminada en tiempo real.

No se cuenta con responsabilidades explícitas en la definición de roles internos, lo que genera nuevos cuellos de botella en la zona productiva de la empresa, reprocesos, no reconocimiento frente a la mejora de un problema puntual, así como falta de comunicación efectiva y clara. Estas dificultades no son solo técnicas, sino que expresan supuestos culturales (donde se prioriza la urgencia sobre el aprendizaje) y un liderazgo con sesgo reactivo, que condiciona el compromiso del equipo a corto, mediano y largo plazo.

La dinámica reactiva de la empresa eleva la presión y reduce la productividad, postergando tareas planificadas y volviendo crónica la atención a urgencias.

### Propuesta organizacional operativa

Se definió una asignación concreta de roles, que detalló las responsabilidades y objetivos mínimos a cumplir a corto y mediano plazo. Además, se indicó la capacitación del jefe de planta con el objetivo de integrar nuevas formas de comunicación interna, llevando a la maximización del flujo de información. De esta forma se pueden manejar e identificar responsabilidades, autoridades y escalabilidad tanto cultural como técnica y salarial. Estas acciones operan como mecanismos primarios de liderazgo (Shein, 2010) porque enseñan los márgenes de importancia y las conductas que se reconocen.

El establecimiento de roles va de la mano con la propuesta de generación de equipos de trabajo, donde se incorporó el rol del coordinador. Esta función es crucial para el correcto funcionamiento operativo, donde cada coordinador puede expresar sus problemáticas usuales al jefe de planta y buscar la mejor forma de solucionarlo bajo el menor costo posible. Es así que se

propuso un nuevo equipo de trabajo: jefe de planta – coordinadores. Esto fomenta la comunicación efectiva, e impacta de forma directa en la correcta gestión de la cultura de la empresa.

Se realizaron reuniones breves de equipo en planta (entre 15 y 20 minutos) con foco fijo en seguridad, calidad y producción. Esto se complementó con la incorporación de un tablero único (estilo Kanban) que se completa de forma diaria para definir el plan y las decisiones operativas que se toman. Se busca reconocer de forma inmediata a la persona que anticipa un desvío del plan propuesto y aquel que ofrece y propone una oportunidad de mejora. Estas rutinas refuerzan Consistencia (coherencia de metas y prácticas) e Involucramiento (participación y responsabilidad), dimensiones clave del modelo de Denison & Mishra 1995.

**Digitalización del control de producción**

A modo de mejorar la comunicación interna y eliminar los reprocesos utilizados hasta el momento para controlar el flujo productivo, se buscó abrir el diálogo optimizando procesos de control de producción versus la forma que se utiliza internamente. Es así que se propuso implementar un tablero de control que integra:

- Seguimiento de pedidos en tiempo real por orden de prioridad y máquina. La Figura 1 muestra un modelo de tablero de pedidos en tiempo real que especifica la información clara del pedido y los saldos disponibles trazables que se encuentran en depósito. Se utiliza edición en tiempo real en la nube, de manera que la información esté en vivo al alcance de todos los actores de los diferentes procesos productivos, aumentando la confiabilidad y trazabilidad de la misma.

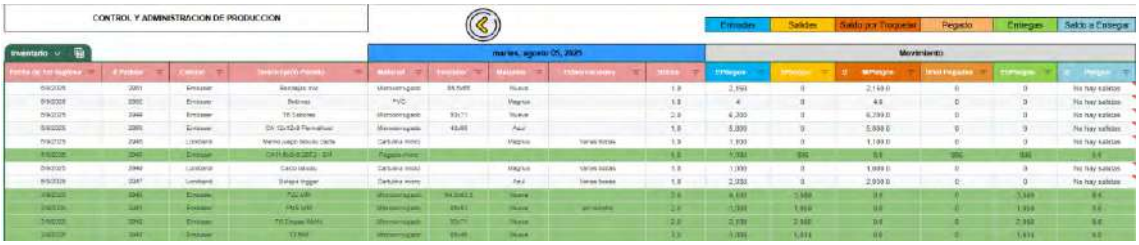



Figura 1 – Tablero de pedidos en curso en tiempo real

- Desarrollo de una aplicación móvil simple de utilizar, para que los operarios en planta puedan interactuar de forma directa con el sistema de control. En la Figura 2 se muestra la forma de utilizarla, donde figuran los pedidos activos por máquina en orden de prioridad, y la cantidad de producción restante, información en planta que hasta el

momento no se tenía y contemplaba reprocesos de comunicación muchas veces poco efectiva.

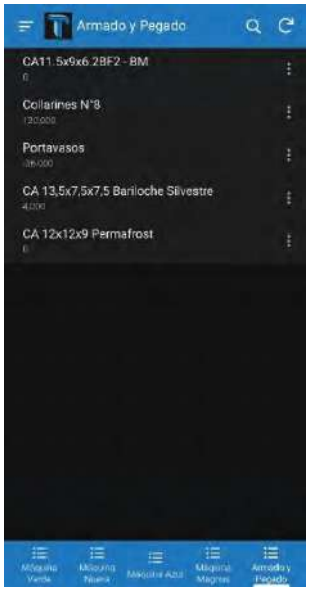



Figura 2 – Aplicación móvil conectada con el tablero de control (*Data entry*)

- El tablero de control propuesto incluye el desarrollo de un sistema donde el usuario pueda interactuar ingresando la información confiable, actual, relevante y precisa de una sola vez (Figura 3), integrado con la automatización de reportes en tiempo real (Figura 4):

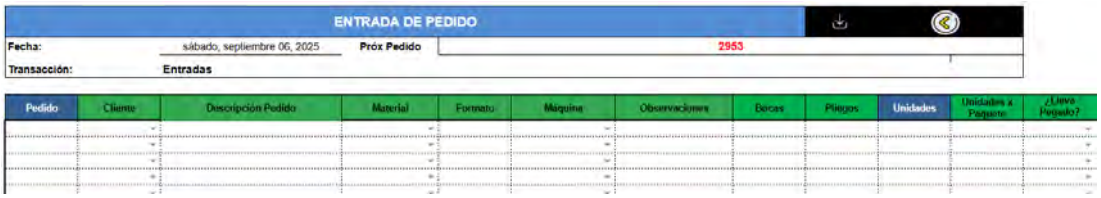



Figura 3 – *Data entry form* para el ingreso de datos al sistema




Figura 4 – Reportes automatizados comparados por lapso temporal

Frente a esta propuesta, se contemplan las siguientes mejoras:

- Bajo costo de implementación: Se busca optimizar la forma en la que se controla la producción internamente de modo de no realizar cambios bruscos en los procesos que ya tienen un buen funcionamiento. El tablero de control digitalizado minimiza los puntos de incertidumbre integrando a los empleados de la organización en esta nueva forma de controlar los procesos.
- Posibilidad de automatización de reportes que funcionen de soporte para la toma de decisiones a corto, mediano y largo plazo. Los reportes de funcionamiento en planta son claves para la correcta comunicación de la producción histórica, que impactan directamente en la forma de liderar, siendo la base de nuevas mejoras en cada sector.
- Cooperación interproceso: se busca simplificar la forma de coordinar los pedidos según los diferentes procesos utilizan el mismo recurso. De esta forma se optimiza la manera de asignar procesos y personal necesario, definiendo de forma clara los objetivos a cumplir.

## Conclusiones

El análisis confirma que liderazgo y cultura organizacional son determinantes del desempeño en la empresa. Clarificar roles, instaurar rutinas y reconocer avances genera consistencia e involucramiento. Además, lo que el liderazgo atiende y mide impacta directamente en los comportamientos productivos y administrativos, habilitando mejoras a largo plazo sostenidas.

Los resultados preliminares muestran mejora de productividad de los últimos meses, como detalla la Figura 4, con mayor cumplimiento del plan diario/semanal, menos reprocesos y mejor flujo de información entre procesos.

Algunos de los siguientes pasos incluyen el desarrollo de KPIs y KBI de cultura-liderazgo, consolidar coordinadores y rutinas diarias de seguridad–calidad–producción, ampliar el tablero a compras, inventarios y logística interna.

Se aprendió que el cambio cultural se muestra al implementar mejoras en la comunicación dirección-planta, transparenta datos y reconoce avances; con recursos acotados, la consistencia cotidiana pesa más que la tecnología. Concluimos que la apertura al diálogo y el reconocimiento de las ideas del equipo contribuyen a una dinámica interna más adaptable y motivadora.

## Referencias


- Bloom, N., & Van Reenen, J. (2007). Measuring and Explaining Management Practices Across Firms and Countries. *The Quarterly Journal of Economics,* p.1351-1408. – World Management Survey.
- Denison R. Daniel Mishra K. Aneil (1995) "Toward a Theory of Organizational Culture and Effectiveness." *Organization Science*. p.204-223.
- Schein, E. H. (2010) *Organizational Culture and Leadership* (4ª ed.). Jossey-Bass.

# “Liderazgo y cultura organizacional como palancas de productividad en una empresa troqueladora”

Autores: Julián Karkaletsis, Nina Bialolenkier

Universidad de Belgrano – Facultad de Ingeniería y Tecnología Informática, Ingeniería Industrial 2025

## Introducción

El trabajo aborda una pyme argentina de troquelado de cartón, que busca mejorar la productividad y el compromiso del personal en un contexto de recursos limitados. Se sostiene que el liderazgo y la cultura organizacional son palancas clave de desempeño, siguiendo los aportes de Schein (2010) y el modelo de Denison y Mishra (1995). La propuesta combina estos ejes con herramientas de digitalización de bajo costo, como tableros en tiempo real y reportes automatizados, para optimizar la gestión y lograr mejoras sostenidas

## Propuesta organizacional

La propuesta organizacional definió roles y responsabilidades claras, junto con la capacitación del jefe de planta para mejorar la comunicación interna y el flujo de información. Se incorporó el rol de coordinador de equipo, clave para canalizar problemáticas y trabajar junto al jefe de planta en la toma de decisiones tácticas y operativas. Además, se implementaron reuniones diarias breves enfocadas en seguridad, calidad y producción, apoyadas por un tablero único de gestión, que facilita la planificación, el seguimiento de desvíos y el reconocimiento de mejoras. Con estas medidas se busca reducir tiempos muertos, evitar reprocesos y elevar la productividad



## Diagnóstico

En la empresa analizada la producción se organiza en función de la urgencia diaria, lo que genera cuellos de botella, reprocesos y presión constante. Los registros manuales dispersos en papel y planillas fragmentan la información y dificultan la trazabilidad de materias primas y productos terminados. La ausencia de roles explícitos y de responsabilidades definidas incrementa la confusión y limita la comunicación interna. La dinámica resultante conduce a mínimos niveles de productividad y a un clima laboral tensionado.

## Propuesta de digitalización

Para superar los límites del control manual, se plantea la implementación de un tablero digital de pedidos en tiempo real, que muestre información clave por cliente, material y máquina. Este sistema se complementa con una aplicación móvil simple para que los operarios carguen datos en planta, y con la automatización de reportes comparativos. La solución permite reducir reprocesos, simplificar la coordinación interproceso y brindar soporte confiable para la toma de decisiones, todo ello con un bajo costo de implementación y un fuerte impacto en la eficiencia.



Figura 1 - Tablero de pedidos en curso en tiempo real

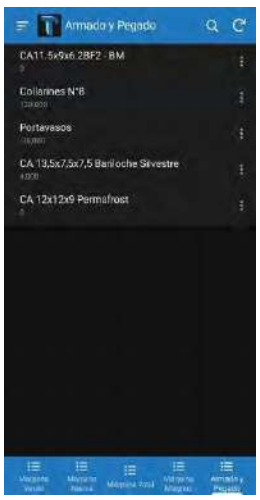





Figura 3 - Data Entry form para el ingreso de datos al sistema

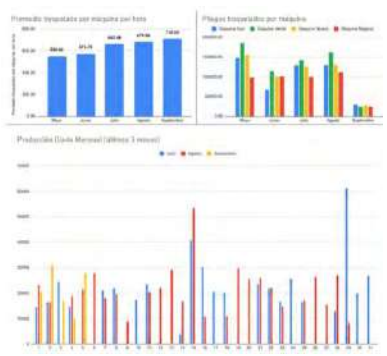


Figura 4 - Reportes automatizados comparados por lapso temporal

## Conclusión

El trabajo integró liderazgo y cultura para alinear prioridades y conductas, rediseño organizacional con roles y coordinadores, y digitalización de bajo costo con tablero, app y reportes automatizados. Los resultados preliminares muestran mejoras en productividad, cumplimiento de planes, reducción de reprocesos y mejor flujo de información. Los próximos pasos incluyen desarrollar indicadores (productividad/hora, lead time, % de reproceso, OTIF), consolidar coordinadores y rutinas diarias de seguridad–calidad–producción, y ampliar el tablero a compras, inventarios y logística. La experiencia evidenció que el cambio cultural se materializa con mejoras en comunicación, transparencia y reconocimiento. Concluimos que la apertura al diálogo y la integración de soluciones digitales accesibles constituyen una estrategia viable y replicable para PyMEs industriales argentinas

*Nuestra propuesta*

- Bajo costo de implementación
- Automatización de reportes
- Cooperación interproceso

***Referencias***

- Icom, N., & Van Reenen, J. (2007).
- Measuring and Explaining Management Practices Across Firms and Countries. The Quarterly Journal of Economics.
- Organizational Culture and Leadership (4ª ed.). Jossey-Bass - 2010
- “Toward a Theory of Organizational Culture and Effectiveness.” Organization Science – 1995

*XVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL - COINI 2025*
*Trabajo de Cátedra Estudiantil (TCE)*

# MONOGRAFÍA:

# Reemplazo de tareas repetitivas y reconversión laboral: un desafío para la Ingeniería Industrial

**Autores:** Agoglia, Franco Matías
**Institución:** Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Universidad Católica Argentina (UCA)
**Eje temático:** Eje 2 - Compromiso Social de la Ingeniería con los Objetivos de Desarrollo Sustentable

# Introducción

Desde los orígenes de la civilización, la humanidad ha tendido a delegar tareas repetitivas y de bajo nivel cognitivo, asociadas al cansancio, la monotonía y la falta de estímulo mental, en mecanismos externos. En la Antigüedad, la mano de obra esclava era utilizada para impulsar embarcaciones o realizar labores de fuerza intensiva; siglos más tarde, la máquina de vapor de la Revolución Industrial marcó un antes y un después al reemplazar el esfuerzo físico humano por energía mecánica, dando inicio a un proceso de transformación productiva que modificó profundamente la organización social y laboral (Frey, 2019; Rifkin, 1995)

En la actualidad, nos encontramos frente a un momento de expansión de esa trayectoria histórica: una nueva etapa de despliegue de la Inteligencia Artificial (IA), un campo iniciado formalmente en los años 1950 (Turing, 1950; McCarthy et al., 1956), potenciada por grandes volúmenes de datos, mayor capacidad de cómputo y nuevos algoritmos (Brynjolfsson & McAfee, 2014; LeCun, Bengio & Hinton, 2015)

Bajo esta continuidad histórica, el problema central ya no es solo qué tareas desaparecerán, sino cómo reconvertirlas en empleos de mayor valor humano, es decir, aquellos que requieren creatividad, juicio y resolución de problemas, consideradas tareas cognitivas no rutinarias según Brynjolfsson y McAfee (2014),

En este proceso, la Ingeniería Industrial cumple un rol primordial para el diseño de procesos y trayectorias de capacitación que aseguren que esta transición constituya un aporte positivo a la sociedad. La evidencia reciente sugiere que el impacto en el empleo dependerá de las políticas de estas nuevas formaciones y rediseños del trabajo; ahí es donde el ensayo toma lugar.

# Desarrollo

### Evolución Histórica de la Automatización

En la Antigüedad, la externalización de tareas repetitivas se apoyaba principalmente en la mano de obra esclava, aplicada a la navegación, la agricultura y la construcción. Por otro

lado, las primeras innovaciones técnicas, como molinos de agua y viento, ofrecieron una alternativa inicial para transformar energía natural en trabajo mecánico, anticipando la idea de sustitución que se consolidaría en la Revolución Industrial.

El verdadero salto importante se produjo en el siglo XVIII con la introducción de la máquina de vapor. Este invento no sólo reemplazó masivamente el esfuerzo físico humano y animal, sino que impulsó un cambio estructural en los sistemas productivos y en la organización social. Como señalan Frey (2019) y Rifkin (1995), la mecanización aumentó la productividad, pero no todo fueron beneficios pues esto conllevo consigo tensiones sociales: desplazamiento de trabajadores, resistencia de los luditas, movimiento obrero inglés del siglo XIX que destruía máquinas como forma de protesta frente al desempleo, y el surgimiento de nuevas desigualdades, reflejadas en la concentración del capital en los propietarios de las fábricas y la precarización laboral de amplias masas obreras.
Durante el siglo XX, la automatización logró una dimensión más compleja con la cadena de montaje fordista, el control numérico y la incorporación de robots industriales. Estos avances transformaron el rol de los trabajadores, que pasaron progresivamente de ejecutar tareas manuales a supervisar y controlar sistemas automáticos. Al mismo tiempo, se abría paso un nuevo campo de investigación: la Inteligencia Artificial, inaugurada con los trabajos de Turing (1950) sobre la posibilidad de máquinas capaces de simular procesos de razonamiento y con la conferencia de Dartmouth en 1956, considerada el nacimiento institucional de la disciplina (McCarthy et al., 1956)

En el siglo XXI, la convergencia entre datos masivos, mayor poder de cómputo y avances en aprendizaje profundo (Deep Learning) impulsó una nueva etapa de la automatización. Lo distintivo de esta fase no es solo la sustitución de fuerza física, sino la capacidad de desplazar tareas cognitivas rutinarias, como el registro de información, la clasificación de datos o la toma de decisiones simples, hasta ahora consideradas dominio exclusivo del intelecto humano (Brynjolfsson & McAfee, 2014; LeCun, Bengio & Hinton, 2015)

**La IA y las tareas repetitivas**

En la actualidad, la Inteligencia Artificial se ha consolidado como una tecnología capaz de asumir tareas rutinarias y repetitivas, tanto físicas como cognitivas, que hasta hace pocas décadas dependían exclusivamente de la acción humana. A diferencia de los robots

industriales clásicos, diseñados para operaciones mecánicas estandarizadas, los sistemas de IA pueden procesar información, aprender patrones y tomar decisiones simples, lo que amplía significativamente el espectro de actividades susceptibles de automatización (Brynjolfsson & McAfee, 2014).

En el comercio minorista, sistemas de autocobro y robots logísticos ya sustituyen cajeros y repositores en tareas repetitivas (McKinsey Global Institute, 2017).

La industria manufacturera también ha experimentado transformaciones profundas. Operarios que antes realizaban labores manuales, como el empaquetado o la inspección visual, son cada vez más sustituidos por brazos robóticos guiados por IA, capaces de identificar defectos en líneas de producción con mayor precisión que un trabajador humano (Ford, 2015). Estos cambios, si bien incrementan la eficiencia y la productividad, generan un dilema social: las ocupaciones de menor calificación, asociadas a rutinas repetitivas, son las más vulnerables al reemplazo tecnológico (OIT, 2021).

Diversos estudios refuerzan esta preocupación. El McKinsey Global Institute estimó que hasta un 30% de las tareas laborales actuales podrían ser automatizadas hacia 2030, especialmente en sectores como transporte, manufactura y comercio (McKinsey, 2017). De manera similar, la Organización Internacional del Trabajo advierte que, en América Latina, cerca del 20% de los empleos formales presentan un alto riesgo de automatización, lo que plantea el desafío urgente de reconvertir a los trabajadores hacia funciones que requieran creatividad, pensamiento crítico y capacidad de adaptación (OIT, 2021).

**Compromiso social y rol de la Ingeniería Industrial**

El avance de la Inteligencia Artificial plantea un dilema que va más allá de la eficiencia productiva: cómo garantizar que la automatización de tareas repetitivas no derive en exclusión social, sino en una oportunidad para elevar la calidad del trabajo humano. En este sentido, la Ingeniería Industrial no puede limitarse a diseñar procesos más eficientes, sino que debe asumir un compromiso social que integre las dimensiones económica, social y ambiental, en línea con los principios de empresas de triple impacto (Elkington, 1997).

Una primera responsabilidad recae en la reconversión laboral. El desplazamiento de cajeros por sistemas de autocobro o de operarios de planta por robots de inspección no debería traducirse en desempleo estructural, sino en una transición hacia roles de mayor valor humano. Aquí, el ingeniero industrial puede actuar como facilitador de programas de capacitación que permitan a los trabajadores desarrollar competencias en áreas como análisis de datos, control de calidad, logística digital y gestión de la experiencia del cliente (OIT, 2021). De esta forma, se evita que la automatización se convierta en un factor de desigualdad y se transforma en un motor de inclusión.

Asimismo, la disciplina tiene un rol estratégico en el diseño organizacional y cultural. La incorporación de IA no es solo un cambio técnico, sino también cultural, que exige nuevas formas de liderazgo y estructuras de trabajo más colaborativas. Los ingenieros industriales, por su formación en gestión de procesos y personas, están en una posición privilegiada para articular modelos que combinen productividad con bienestar laboral, fomentando entornos inclusivos, motivadores y éticamente responsables (Brynjolfsson & McAfee, 2014).

Finalmente, el compromiso social de la Ingeniería Industrial también implica promover una visión de largo plazo, donde la automatización se vincule con el desarrollo sostenible. La reducción de tareas repetitivas debe ser vista como una oportunidad para reorientar la fuerza laboral hacia funciones creativas, innovadoras y de impacto social positivo. En este escenario, la IA deja de ser un riesgo para convertirse en una herramienta que, gestionada con responsabilidad, contribuye a un futuro laboral más humano y equitativo.

## Conclusiones

El recorrido histórico de la automatización demuestra que la sustitución de tareas repetitivas ha acompañado a la humanidad desde sus orígenes. Desde la utilización de mano de obra esclava y los primeros ingenios mecánicos hasta la Revolución Industrial y los robots industriales del siglo XX, cada etapa tecnológica incrementó la productividad, pero también expuso tensiones sociales y desigualdades.

A diferencia de revoluciones anteriores, la expansión contemporánea de la Inteligencia Artificial introduce un cambio cualitativo: no solo reemplaza la fuerza física, sino que

también pone en cuestión el papel del ser humano en tareas cognitivas rutinarias. Esto obliga a redefinir qué entendemos por empleo valioso y a priorizar capacidades como la creatividad y el pensamiento crítico. El dilema actual ya no es si la automatización ocurrirá, sino cómo asegurar que sus beneficios se distribuyan de forma justa.

La Ingeniería Industrial tiene un rol estratégico en esta transición. No basta con diseñar procesos eficientes: es imprescindible impulsar programas de reconversión laboral, fomentar entornos inclusivos y promover modelos de triple impacto que integren rentabilidad, equidad social y sostenibilidad ambiental.

En síntesis, la IA representa una oportunidad histórica para liberar a las personas de tareas monótonas y orientarlas hacia empleos de mayor valor humano. El desafío está en gestionarla con responsabilidad, para que no sea un fin en sí mismo, sino una herramienta al servicio de una sociedad más equitativa y humana.

## Bibliografía


- Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). *The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies*. W. W. Norton & Company.

- Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Capstone.

- Ford, M. (2015). *Rise of the robots: Technology and the threat of a jobless future*. Basic Books.

- Frey, C. B. (2019). *The technology trap: Capital, labor, and power in the age of automation*. Princeton University Press.

- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. https://doi.org/10.1038/nature14539

- McCarthy, J., Minsky, M., Rochester, N., & Shannon, C. (1956). *A proposal for the Dartmouth summer research project on artificial intelligence*. Dartmouth College.

- McKinsey Global Institute. (2017). *Jobs lost, jobs gained: Workforce transitions in a time of automation*. McKinsey & Company. https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/jobs-lost-jobs-gained

- Organización Internacional del Trabajo. (2021). *El futuro del trabajo en América Latina y el Caribe*. Oficina Regional para América Latina y el Caribe, OIT. https://www.ilo.org

- Rifkin, J. (1995). *The end of work: The decline of the global labor force and the dawn of the post-market era*. G. P. Putnam's Sons.

- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236), 433–460. https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433

# De trabajos repetitivos a empleos de valor

## en 5 ideas claves

### Evolución Histórica

1

De esclavos
→ máquina de vapor
→ robots industriales
→ IA

### IA actual

2

Automatiza tareas físicas y cognitivas rutinarias.

### Impacto social

3

30% de tareas automatizables (McKinsey), 20% empleos en riesgo (OIT).

### Rol de la Ingeniería Industrial

4

Reconversión laboral, procesos inclusivos, triple impacto.

### Conclusión

5

Oportunidad histórica: liberar tareas monónotas y fortalecer empleos de valor humano




# EVALUACIÓN DE COMPETENCIAS DE EGRESO EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL: UN ESTUDIO EXPLORATORIO DESDE LA EXPERIENCIA ESTUDIANTIL

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – FACULTAD REGIONAL SAN NICOLÁS**

**Autora: Parra, Pamela**

## Introducción

El contexto actual de la educación superior, la evaluación y el desarrollo de competencias de egreso en los estudiantes constituye un aspecto central para garantizar la calidad de la formación universitaria y su relación con las demandas sociales, tecnológicas y laborales. En carreras como Ingeniería Industrial, el diseño de planes de estudio basados en competencias resulta fundamental para lograr que los egresados puedan desempeñarse de manera eficaz en entornos dinámicos, complejos y globalizados.

El presente trabajo se centra en la experiencia de estudiantes que participaron activamente en un proyecto de relevamiento de información sobre competencias de egreso en dos universidades argentinas. Dicho relevamiento se realizó como parte de un proyecto de investigación mayor, orientado a analizar en qué medida las competencias promovidas por los planes de estudio y percibidas por los estudiantes responden a los desafíos profesionales, sociales y éticos de la Ingeniería Industrial.

Esta experiencia no solo permitió obtener información relevante para el desarrollo del proyecto de investigación, sino que también generó un espacio formativo para los propios estudiantes involucrados, quienes ejercitaron competencias relacionadas con la investigación, el análisis crítico, la comunicación y el trabajo en equipo. En este ensayo se presentan los principales aspectos de la experiencia, los aprendizajes derivados de la misma y las conclusiones alcanzadas, con el objetivo de contribuir a la reflexión sobre la formación en competencias de egreso y su impacto en la práctica profesional.

## Desarrollo

## Marco teórico

Las universidades de ingeniería forman profesionales con saberes específicos y genéricos para la resolución de problemas; las empresas esperan incorporar ingenieros competentes, y cada estudiante busca consolidar su formación en el campo de la industria y/o el servicio (Gallegos et al., 2022). Se espera que las personas que egresen dispongan de capacidades de

egreso complejas e integradas, relacionadas con conocimientos teórico - contextual - procedimental y que se vinculan con las distintas competencias que relacionan el saber hacer (formalizado - empírico - relacional) con el contexto de la labor (escenario en donde ejercer) y referidas al desempeño (ME Res. 1543, 2021).

En trabajos anteriores, se analizaron los desafíos de acercar al futuro profesional de ingeniería industrial al contexto actual a través de distintos mecanismos de articulación institucionales (Cinalli et al., 2024). Asimismo, se han realizado diagnósticos sobre la base de datos actualizada de estudiantes avanzados que, por razones sociales, económicas o familiares, no culminaron su carrera. Dichas bases son el Proyecto denominado Retomando Industrial, el plan rEGRESAR lanzado en el año 2023 por la UNR, la articulación entre actores (docentes, directivos y áreas administrativas de la Facultad) y el relevamiento por competencias. (Gómez et al., 2023). Estos antecedentes evidencian la importancia de relevar información sobre cómo perciben los estudiantes avanzados el grado de desarrollo de sus competencias de egreso, ya que ello constituye una herramienta de diagnóstico y, al mismo tiempo, una oportunidad de mejora para las instituciones educativas.

## Metodología utilizada

El relevamiento se llevó a cabo en dos universidades argentinas con perfiles institucionales y contextos diferentes, lo que posibilitó contrastar percepciones en escenarios diversos. Para ello, se aplicó una encuesta estructurada a estudiantes avanzados de Ingeniería Industrial con experiencia laboral previa, de manera de relevar opiniones que integraran tanto la formación académica recibida como su aplicación en la práctica profesional. Las encuestas incluyeron preguntas sobre:

- Competencias específicas: dirigir, gestionar, optimizar, controlar, evaluar, rediseñar, entre otras, las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de bienes, servicios o productos, gestión de la producción, logística, optimización de procesos, etc.

- Competencias genéricas y tecnológicas: liderazgo, aprendizaje continuo y autónomo, trabajo en equipo, comunicación oral y escrita, actuar con espíritu emprendedor, identificación y resolución de conflictos.

- Percepción global y futura: nivel de preparación para enfrentar los desafíos del mercado laboral y confianza en el propio perfil profesional, elección de materias electivas, continuación de sus estudios, entre otros.

## Resultados preliminares

El análisis de la información recogida mostró coincidencias en las percepciones de los estudiantes de ambas universidades, así como algunas diferencias asociadas a los contextos institucionales.

1. Fortalezas identificadas:

    - Se reconoce una sólida formación en herramientas analíticas y cuantitativas. Los estudiantes destacan la capacidad de resolver problemas técnicos, aplicar métodos de optimización, habilidades de autogestión y utilizar software específico para el modelado de procesos.

    - En ambas universidades se valora la formación en gestión de procesos y planificación estratégica, competencias centrales de la Ingeniería Industrial.

2. Áreas de oportunidad o desafíos:

    - Se evidencian debilidades en el desarrollo de habilidades sociales y de liderazgo. Los estudiantes señalan que, si bien se trabaja en equipo en distintas asignaturas, no siempre se promueve un aprendizaje profundo en negociación, comunicación. Si destacan en las respuestas, la gestión de nuevas responsabilidades y liderazgo en equipos de trabajo como una oportunidad, así como, la organización del tiempo y gestión de prioridades en entornos laborales dinámicos.

- Uso de herramientas digitales y tecnológicas: necesidad de mayor formación en software avanzado (ERP, Power BI, simuladores, herramientas de análisis de datos).

3. Percepción general:

   - Existe confianza en la capacidad técnica adquirida, pero al mismo tiempo una demanda de mayor formación integral que permita desempeñarse con eficacia en entornos complejos y multidisciplinarios.

## Aprendizajes de la experiencia estudiantil

Esta experiencia de participar en el relevamiento de la información, constituyó una oportunidad de aprendizaje significativa para los estudiantes que llevamos adelante la iniciativa de generar la encuesta. Entre los principales aportes se destacan:

- Desarrollo de competencias de investigación: el diseño de encuestas, la recolección de datos y el análisis de resultados implicaron la aplicación de metodologías científicas que enriquecieron la formación académica. En particular, el proceso de elaborar un primer borrador de la encuesta a partir de las necesidades detectadas fue un ejercicio que me permitió conectar la teoría con la práctica.

- Trabajo colaborativo: la coordinación entre estudiantes fomentó la cooperación y la construcción de consensos, así como la organización de tareas para la sistematización de la información.

- Nuevos aprendizajes en el ámbito académico: incluso con experiencia previa en el ámbito privado, el contacto con la investigación significó enfrentar desafíos distintos: interpretar los datos desde una perspectiva científica, redactar resultados preliminares a partir de evidencias, y transformar los hallazgos en productos académicos concretos, como pósteres o artículos.

- Reflexión crítica: al analizar las competencias de egreso, los propios estudiantes se vieron interpelados sobre su formación personal, reconociendo fortalezas y debilidades en su propio perfil.

- Compromiso con la mejora educativa: la participación activa en un proyecto de investigación vinculado con la calidad de la educación superior reforzó la motivación de los estudiantes hacia el compromiso social y académico de su futura profesión.

## Conclusiones

La experiencia de relevamiento de competencias de egreso en dos universidades argentinas constituye un aporte significativo para reflexionar sobre la formación de futuros ingenieros industriales. Los resultados muestran que los estudiantes poseen una sólida preparación técnica, aunque persisten desafíos en el desarrollo de competencias blandas y en la integración transversal del compromiso social y ambiental en los planes de estudio.

El proceso de participación activa se transformó en una instancia formativa, donde los estudiantes desarrollaron habilidades de investigación, comunicación, análisis crítico y trabajo colaborativo. Competencias valoradas en el ámbito profesional y que refuerzan la pertinencia de su participación en procesos de evaluación y mejora educativa.

Mi participación como becaria en el diseño y ejecución de la encuesta fortaleció el carácter colaborativo de la investigación y aportó una mirada cercana a la experiencia estudiantil, enriqueciendo la validez del instrumento y promoviendo un espacio de construcción conjunta de conocimiento. Considero que el involucramiento temprano en proyectos potencia el aprendizaje personal.

Más allá de los resultados obtenidos, para mí la experiencia significó una formación como investigadora en práctica: entrenarme en el diseño de instrumentos, la sistematización de datos, la redacción de resultados preliminares y la interpretación crítica de la información. Asimismo, me permitió vivenciar el ciclo completo de la investigación académica —desde el relevamiento de necesidades hasta la comunicación de los hallazgos en diferentes formatos

(póster, paper)— consolidando competencias que trascienden el ámbito privado y proyectan una trayectoria científica.

En síntesis, esta investigación confirma que las competencias de egreso son estratégicas para comprender y mejorar la formación en Ingeniería Industrial, actuando como un puente entre la academia, el mundo laboral y las demandas de una sociedad en transformación. Como becaria de la UTN, pude combinar mi mirada como estudiante —con la cercanía a las problemáticas de mis pares— con el inicio de un recorrido académico en investigación, lo que favoreció el desarrollo de competencias vinculadas con la autogestión, la responsabilidad académica, la escritura científica y la reflexión crítica. Esta vivencia fortaleció mi motivación para continuar formándome como futura investigadora, con la intención de contribuir a la mejora de la calidad educativa en la Ingeniería Industrial.

## Bibliografía


Parra, P.; Muñoz, L.; Kozicki, L.; Cinalli, M.; Gallegos, M.L.; Gómez, D.; Salguero, M.G., COMPETENCIAS DE EGRESO Y DESEMPEÑO PROFESIONAL EN INGENIERÍA INDUSTRIAL: DESAFÍOS ACTUALES, XVIII Jornadas de Ciencias, Tecnologías e Innovación (2024), FCEIA de UNR. Disponible en: https://rephip.unr.edu.ar/items/c362067d-2738-4d9f-957d-e300210a3a84

Parra, P.; Muñoz, L.; Kozicki, L.; Cinalli, M.; Gallegos, M.L.; Gómez, D.; Salguero, M.G., COMPETENCIAS DE EGRESO Y DESEMPEÑO PROFESIONAL EN INGENIERÍA INDUSTRIAL: DESAFÍOS ACTUALES, XVIII Jornadas de Ciencias, Tecnologías e Innovación (2024), FCEIA de UNR. Disponible en: https://jornadasctei.unr.edu.ar/competencias-de-egreso-y-desempeno-profesional-en-ingenieria-industrial-desafios-actuales/

MINISTERIO DE EDUCACIÓN (2021). Resolución 1543. “Estándares para la Acreditación - Ingeniero Industrial Anexo IV”. Buenos Aires, Argentina.

UTN CS (2023). Res. 1908. “Diseño Curricular de Ingeniería Industrial”. Buenos Aires.

Universidad Católica Argentina
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias

# Homicidios dolosos en Argentina: Predicción de vínculo víctima-victimario

Trabajo Final de Ingenier´ıa Industrial

Francisco Gallegos Luque - Ignacio Félix Massun

Tutor: Emilio Osvaldo Picasso
Cotutor: Emilio Pugnaloni
Buenos Aires, Junio de 2025

# Índice

**1. Resumen** **2**

**2. Introducción** **3**

**3. Objetivos** **6**

**4. Metodología** **7**
4.1. Base de datos ... 8
4.1.1. Origen ... 8
4.1.2. Procesamiento ... 9
4.1.3. Descripción General ... 14
4.2. Estrategia de Análisis Exploratorio ... 15
4.3. Modelado Explicativo ... 15
4.3.1. Modelo Logístico Multinomial ... 16
4.4. Modelado Predictivo ... 17
4.4.1. Gradient Boosting ... 18
4.4.2. Criterio de Elección del Modelo ... 20

**5. Resultados** **24**
5.1. Análisis Exploratorio ... 24
5.2. Modelo explicativo ... 28
5.3. Modelo predictivo ... 29

**6. Conclusiones** **34**

**7. Bibliografía** **35**

**8. Apéndice** **37**

# 1. Resumen

El presente trabajo tiene como objetivos principales analizar y desarrollar un modelo de predicción para determinar el vínculo entre la víctima y el victimario en homicidios dolosos ocurridos en Argentina durante los años 2017 a 2023, a partir de una base de datos del Ministerio de Seguridad. Se busca identificar patrones en las variables disponibles que permitan inferir si el vínculo es familiar, no familiar, o si no hay vínculo, empleando modelos estadísticos de clasificación, con énfasis en técnicas accesibles para su implementación en contextos judiciales o criminológicos. Se desarrollan dos modelos: uno explicativo (regresión logística multinomial) y otro predictivo (gradient boosting) para identificar y anticipar relaciones entre los protagonistas del crimen (relación familiar, no familiar, o sin relación)

El trabajo se estructura en varias etapas. En primer lugar, se realiza una exploración y limpieza de los datos, dado que la base original presenta valores faltantes, inconsistencias y una estructura que requiere preprocesamiento para su análisis. Posteriormente, se seleccionan y transforman variables clave que pudieran tener relación con el tipo de vínculo entre víctima y victimario. Entre estas se encuentran el sexo y la edad de la víctima, el día del hecho, el uso de armas, entre otras.

A continuación, se procede a una etapa de análisis descriptivo, donde se identifican diferencias entre los tres tipo de vínculos. Se observa que en los homicidios con vínculo familiar hay mayor presencia de víctimas mujeres, suelen ocurrir en el hogar y no se asocian con un delito. También se evidencia que el uso de armas de fuego es más frecuente en homicidios a manos de desconocidos, por ejemplo.

En cuanto a la modelización, se analizaron distintos algoritmos de clasificación, evaluando su desempeño mediante técnicas de validación cruzada y métricas como el acierto general, el $F_1$-score y el índice Kappa de Cohen. Uno de los principales hallazgos es que ciertas variables tienen un peso considerable en la predicción del vínculo. Por ejemplo, el sexo de la víctima, el lugar del hecho y la presencia o no de arma de fuego resultan ser factores determinantes. A partir de esto, se construye un modelo final que logra una precisión aceptable (acierto general: 65,8 %, $F_1$: 65 %) y que podría ser implementado como herramienta de apoyo para fiscales, jueces o analistas en el abordaje inicial de un caso de homicidio, facilitando una mejor comprensión del entorno del hecho.

El trabajo concluye destacando la importancia de aplicar herramientas estadísticas en el análisis de fenómenos criminales, no como sustituto del juicio humano, sino como complemento que permita guiar líneas de investigación con mayor eficiencia. Asimismo, se reconocen las limitaciones del estudio, tales como la calidad de los datos, la ausencia de información sobre contexto socioeconómico o histórico de violencia previa, y la naturaleza inherentemente compleja de los vínculos humanos.

Finalmente, se sugiere continuar esta línea de investigación incorporando técnicas más avanzadas, además de promover la mejora en la recolección y sistematización de datos por parte de los organismos estatales. Esto permitiría no solo mejorar la predicción, sino también comprender mejor los factores estructurales detrás de la violencia en Argentina.

## 2. Introducción

La Real Academia Española define homicidio doloso como la "causación de la muerte de otra persona de forma consciente y voluntaria" (Diccionario panhispánico del español jurídico, 2025). Entre los crímenes que Argentina y América Latina en general sufren, los homicidios representan uno de los peores (sino el peor) y más perturbadores para la sociedad.

Argentina presenta indicadores tanto alarmantes como esperanzadores en cuanto a homicidios respecta cuando se los compara con el resto de los países latinoamericanos. Las estadísticas de homicidios en Argentina y en el mundo se presentan en la Tabla 1.

| Zonas Geográficas | Región | Homicidios totales | | Homicidios cada 100 mil personas | | Variación (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2000 | 2018 | 2000 | 2018 | |
| África | | 108100 | 158200 | 13.3 | 12.2 | -8.3 |
| América | EEUU - Canadá | 16100 | 17000 | 5.1 | 4.6 | -9.8 |
| | Latinoam. y Caribe | 114300 | 151900 | 21.0 | 23.9 | 13.7 |
| Asia | | 125000 | 98200 | 3.4 | 2.2 | -35.3 |
| Australia y NZ | | 400 | 300 | 1.8 | 1.0 | -43.7 |
| Europa | | 56500 | 20500 | 7.7 | 2.7 | -64.9 |
| **Argentina** | | 3129 | 2387 | 8.4 | 5.4 | **-35.6** |

Tabla 1: Fuente: Adaptado de Bergman et al. (2023) con base a UNODC (2022).

América Latina tiene la tasa de homicidios más alta del mundo. En el año 2018, hubo 23,9 homicidios cada 100 mil personas: casi el doble que en África y más de 8 veces superior a la de Europa. Además, entre los años 2000 y 2018, Latinoamérica y el Caribe fueron las únicas regiones que aumentaron esta tasa, alcanzando un aumento del 13,7 %. Con solo el 8 % de la población mundial, el 33 % de los homicidios globales ocurren en la región: una tasa de homicidios cada 100.000 habitantes 20 veces superior a la de Reino Unido (Jaitman & Ajzenman, 2016).

En cuanto a la Argentina en 2018, la cantidad de homicidios cada 100 mil personas fue de 5,4, más de 4 veces menor a la media de la región (23,9 homicidios cada 100 mil personas). Además, la variación de esta tasa entre 2000 y 2018 se vio disminuida en un 35,6 %, una evolución opuesta a la de Latinoamérica y el Caribe. Siguiendo esta tendencia favorable, Argentina presentó en 2024 una tasa de 3,8 homicidios por cada 100.00 habitantes, muy inferior a la de la región que alcanza los 20,2 homicidios por cada 100.000 habitantes (Manjarrés et al., 2025). Para el país, según el Sistema Nacional de Información Criminal (2025), esta tasa es la más baja en los últimos 25 años. A pesar de los datos esperanzadores, Argentina presenta una tasa de homicidios considerablemente superior a la de países como España (0,69 homicidios cada 100.000 habitantes en 2023) o Australia (0,8 homicidios cada 100.000 habitantes en 2023)(UNODC, 2025).

Un homicidio doloso es procesado por el sistema penal, que se desarrolla en distintas etapas. Al momento de un homicidio, primero acuden generalmente las fuerzas policiales, quienes informan a la fiscalía sobre el hecho. En último lugar, se incorpora la instancia judicial (juez/jueza) quien pasa a ser responsable de la causa (Bergman et al., 2021). Como cabe esperar, una de las herramientas más efectivas para disminuir la cantidad de homicidios dolosos es un efectivo uso de la justicia penal. Por lo tanto, es importante la relación entre el número de homicidios y la cantidad de condenas firmes. Esta relación conlleva una dinámica dual en donde una medida afecta directamente a la otra. Por un lado, debido a un efecto de disuasión, según Patternoster (2010) y Nagin (1998), el número de homicidios se verá disminuido si la tasa de condenas firmes aumenta, ya que una mayor probabilidad de ser detenido desalienta a las personas a cometer este delito. Por otro lado, el aumento en la cantidad de homicidios dolosos en un país reduce el número de

condenas firmes, puesto que los limitados recursos del sistema penal imposibilitan el estudio en profundidad para cada caso. En el período 2002-2021, por cada 100 víctimas de homicidio hubo 65 condenas firmes (Bergman et al., 2021). En 2022, según datos del Registro Nacional de Reincidencia, un homicidio demoró en promedio cuatro años y cinco meses en proferir una sentencia.

En este contexto, surge la necesidad de aumentar el número de herramientas para detectar y condenar efectivamente a los responsables de homicidios dolosos. En el último tiempo, se ha incorporado el uso de Inteligencia Artificial y modelos descriptivos y predictivos a partir de grandes volúmenes de datos para pronosticar y formular potenciales resultados (Rigano, 2019). En particular, en la justicia penal, este trabajo depende principalmente de las fuerzas policiales, peritos y fiscales que deben obtener experiencia durante muchos años, lo cual conlleva mucho tiempo y está sujeto a objetividad y error (Rigano, 2019). En consecuencia, la implementación de estas nuevas herramientas podría potencialmente ayudar a obtener un mejor entendimiento de la realidad delictiva para así lograr disminuirla.

Particularmente, en materia de análisis de datos en el proceso penal, se han realizado múltiples estudios que abordan la relación que existe entre las características de un hecho delictivo, como un homicidio doloso, y su presunto autor. En estos estudios se sugiere que distintas variables sociodemográficas y variables situacionales del homicidio juegan distintos roles en la probabilidad de que la relación entre la víctima y el victimario sea de algún tipo en específico (Cao et al., 2007). Esto quiere decir que el vínculo entre los protagonistas de un homicidio doloso puede determinar las características del hecho, ya sea desde el lugar y la hora del asesinato hasta el método utilizado para matar, entre otros. Este tipo de análisis permite orientar la investigación en situaciones donde no se cuenta con la información necesaria para realizar una sentencia definitiva. Como plantea Heymann (1985), identificar posibles indicadores de la relación víctima-victimario puede ser útil para facilitar las investigaciones criminales, al reducir el número de posibles sospechosos. No solo se reduciría el tiempo del proceso judicial, sino que también se evitan subjetividades y falsas interpretaciones. Aunque cada caso es particular y conlleva un análisis en profundidad, este enfoque permite obtener ciertos indicios y herramientas para una mejor resolución del caso.

El siguiente estudio busca aplicar lo investigado sobre vínculos víctima-victimario en el análisis de homicidios dolosos al caso particular de la Argentina, mediante el desarrollo de un modelo con carácter explicativo que permita identificar relaciones significativas entre variables, y un modelo predictivo orientado a clasificar dicho vínculo en función de las características del homicidio.

El presente trabajo se organiza en varias secciones. A continuación, se presenta un resumen de antecedentes de estudio similares en Argentina y el resto del mundo. En la sección 2 se formalizan los objetivos. En la sección 3 se describe la metodología respecto a la base de datos empleada, el análisis exploratorio de la misma, el modelado explicativo y el modelado predictivo. En la sección 4, se presentan los resultados obtenidos y sus conclusiones se desarrollan en la sección 5. Por último, se detalla la bibliografía utilizada en la sección 6 y se anexan los archivos de código en lenguaje R del tratamiento de los datos y los modelos empleados en la sección 7.

## Antecedentes en Argentina y el resto del mundo

El vínculo víctima-victimario está sujeto a distintas interpretaciones en cuanto a su clasificación. Por un lado, basado en estudios previos, Decker (1993) propuso una clasificación de acuerdo con el grado de cercanía entre víctima y victimario, discriminando en cinco grupos: desconocidos, conocidos, amigos, vínculos románticos y parientes no románticos. No obstante, el mismo Decker cuestionó su clasificación alegando que resulta muy difícil separar entre conocidos y amigos, y que la clasificación puede resultar muy arbitraria. Riedel (1987), en cambio, propone la clasifi-

cación que adoptará nuestro estudio: desconocidos, vínculos no familiares (amigos, conocidos, empleadores, etc.) y vínculos familiares/románticos.

Existen trabajos similares realizados en otras partes del mundo. Destaca el estudio de Cao et al. (2008), que utiliza una clasificación de los homicidios basada en la relación víctima–victimario mediante una regresión logística multinomial, para identificar de manera más precisa los factores asociados a tres tipos diferentes de relación en homicidios. Los tres tipos de relación son los propuestos por Riedel previamente mencionados. El estudio se limita a los homicidios registrados en Taiwán entre 1994 y 1998. Presenta un análisis descriptivo de los factores en homicidios, pero no detalla un modelo predictivo.

En líneas similares, el trabajo de Kim, Chopin y Beauregard (2024) se centra en el uso de características victimológicas y de la escena del crimen para predecir la relación víctima-victimario en homicidios sexuales. Se acota a homicidios ocurridos en Francia y Canadá entre 1948 y 2018. A partir de los datos obtenidos, el estudio utiliza análisis bivariado, regresión logística binaria secuencial y un modelo de red neuronal artificial para examinar las correlaciones y los valores predictivos de diversos factores para determinar la naturaleza de la relación víctima-victimario. Utiliza un total de 23 variables dicotómicas vinculadas con la escena y el contexto del crimen clasificadas según: actividad y lugar en el que estaba involucrada la víctima, comportamientos sexuales y comportamiento post-mortem del victimario. A pesar de estar acotado al ámbito de los homicidios sexuales, propone una metodología concreta para entender mejores patrones de comportamiento y relación en este tipo de crímenes.

En un tenor más descriptivo, Drawdy y Myers (2004) examinan las correlaciones entre la relación víctima/victimario y tres variables: motivo, elección de arma y número de lesiones infligidas. La muestra consistió en 57 casos de homicidios intencionales en Florida entre los años 1992 y 1996. Al igual que Wolfgang (1958), las relaciones se dividieron en categorías primarias (familiares y amigos) y secundarias (conocidos y desconocidos).

En cuanto a estudios basados en la situación criminalística en Argentina, se logra ahondar en el análisis de la geolocalización de los homicidios en distintas partes del país. Por un lado, Ramos et al. (2022) presentan una investigación cualitativa en la ciudad de Córdoba en donde refuerzan la idea de que la desorganización social en una zona urbana por problemáticas socioeconómicas incrementa la violencia interpersonal, la cual puede desencadenar, en situaciones extremas, en homicidio. Sin embargo, con respecto a los homicidios realizados dentro del hogar, la predicción de los mismos resulta más compleja ya que su motivación podría tener un entramado de características contextuales, sociales, psicológicas y de género. Por otro lado, se han realizado estudios descriptivos de la situación criminalística en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, identificando las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de los delitos en cuestión. No obstante, todavía no se ha estudiado la posible relación entre las características del homicidio y el vínculo entre la víctima y el victimario en base a los datos estadísticos de Argentina.

América Latina y Argentina en particular no cuentan con un destacado historial en materia de ciencia de datos y estadística para la resolución de problemas corrientes, y sí cuentan con un triste historial de tasas de homicidios extremadamente altas. Los estudios descriptivos y predictivos en materia de homicidios, si bien son cada vez más frecuentes, no parecen estar a la altura de la situación. A nivel mundial, a pesar de haber muchos antecedentes, priman los estudios de carácter descriptivo por sobre los predictivos. En particular, ningún estudio previo ha intentado hacer un análisis descriptivo y un modelo predictivo del vínculo víctima-victimario con la información disponible de homicidios dolosos en Argentina recientemente.

## 3. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es profundizar en los análisis de los homicidios dolosos en Argentina para aportar herramientas a los agentes responsables del proceso penal. Específicamente, definiremos el objetivo del siguiente estudio en dos grandes categorías:

1. Describir y demostrar la existencia de patrones de correlación entre factores del homicidio y el vínculo víctima-victimario en homicidios dolosos en Argentina
2. Desarrollar un modelo capaz de predecir con cierto grado de significancia el vínculo víctima-victimario en homicidios dolosos en Argentina a partir de factores propios del homicidio.

# 4. Metodología

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos, se partió de una base de datos para realizar un análisis exploratorio de los homicidios del país, un modelo explicativo y otro predictivo. Debido a la complejidad de la recolección de información en el proceso penal, la fuente de datos criminalísticos en Argentina es incompleta y desorganizada. En consecuencia, previo al análisis de datos, fue conveniente realizar una propia preparación de los mismos.

Luego de adaptar y hacer un análisis exploratorio de la base de datos, se desarrolló un modelo a partir de una regresión logística multinomial para realizar un análisis explicativo de los homicidios en el país. También, se realizó un modelo predictivo en base a algoritmos de *gradient boosting* y se lo evaluó para corroborar su nivel de concordancia con la realidad.

A continuación se desarrollan en profundidad cada uno de los pasos realizados para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

## 4.1. Base de datos

### 4.1.1. Origen

Según los datos más recientes provistos por el Ministerio de Seguridad de la Nación, Dirección Nacional de Estadística Criminal (2024), los homicidios dolosos cometidos a una persona en Argentina mostraron una leve disminución a los largo de los años. En 2023 se registraron 1 699 casos, casi un 18 % menos a los 2 071 casos ocurridos en 2017. Entre estos años los homicidios dolosos con una sola víctima y victimario alcanzaron 2 122 casos en 2018, 1 909 en 2019, 1 946 en 2020, 1 685 en 2021 y 1 579 en 2022.

Durante estos 7 años de registro, fueron documentadas 14 999 observaciones con 46 variables distintas. Entre estas, se incluyen homicidios dolosos de una o múltiples víctimas y de uno o múltiples victimarios. A continuación se detallan las variables de la base de datos:

1. id_hecho
2. tipo_hecho_segun_victima
3. tipo_persona_id
4. tipo_persona
5. cant_inc
6. cant_vic
7. federal
8. provincia_id
9. provincia_nombre
10. departamento_id
11. departamento_nombre
12. localidad_id
13. localidad_nombre
14. radio_censal
15. latitud_radio
16. longitud_radio
17. anio
18. mes
19. fecha_hecho
20. hora_hecho
21. tipo_lugar
22. tipo_lugar_otro
23. tipo_lugar_ampliado
24. clase_arma
25. clase_arma_otro
26. en_ocasion_otro_delito
27. en_ocasion_otro_delito_otro
28. motivo_origen_registro
29. motivo_origen_registro_otro
30. victima_sexo
31. victima_identidad_genero
32. victima_identidad_genero_otro
33. victima_tr_edad
34. victima_18_años_o_mas
35. victima_clase
36. victima_clase_otro
37. victima_situacion_ocupacional
38. victima_situacion_ocupacional_otro
39. **victima_relacion_inculpado**
40. inculpado_sexo
41. inculpado_identidad_genero
42. inculpado_identidad_genero_otro
43. inculpado_tr_edad
44. inculpado_clase
45. inculpado_otro_clase
46. inculpado_relacion_victima

### 4.1.2. Procesamiento

Sin embargo, no todos estos datos fueron utilizados para el desarrollo del modelo. En primer lugar, se consideraron exclusivamente los homicidios dolosos en los cuales hubo una sola víctima y un solo inculpado, es decir, se descartaron aquellos casos en los cuales hubo más de una víctima y/o inculpado.

En segundo lugar, se seleccionaron aquellas variables con mayor relevancia para los objetivos planteados y se descartaron las variables con más de un 40 % de observaciones faltantes.
Las variables remanentes resultaron:

1. localidad_nombre
2. mes
3. fecha_hecho
4. tipo_lugar
5. clase_arma
6. en_ocasion_otro_delito
7. motivo_origen_registro
8. victima_identidad_genero
9. victima_tr_edad
10. victima_clase
11. **victima_relacion_inculpado**

Las 11 variables resultantes fueron adaptadas y renombradas de acuerdo a los requerimientos del modelo en 11 variables explicativas y una variable respuesta:

- Primera variable explicativa

| **Nombre de la variable** | poblacion |
|---|---|
| **Descripción** | Cantidad de habitantes en la localidad del hecho |
| **Tipo de variable** | Numérica |
| **Comentarios** | A partir de la variable explicativa **localidad_nombre** y los resultados del Censo 2022 del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC), se reemplaza la variable existente por la cantidad de habitantes de la localidad donde ocurre el homicidio doloso. |

- Segunda variable explicativa

| **Nombre de la variable** | mes |
|---|---|
| **Descripción** | Mes de ocurrencia del hecho |
| **Tipo de variable** | Numérica |
| **Comentarios** | Valores con los que aparece: 1 a 12. |

- Tercera variable explicativa

| **Nombre de la variable** | dia |
|---|---|
| **Descripción** | D´ıa del mes de ocurrencia del hecho |
| **Tipo de variable** | Numérica |
| **Comentarios** | Valores con los que aparece: 1 a 31. |

- Cuarta variable explicativa

| **Nombre de la variable** | dia_mes |
|---|---|
| **Descripción** | D´ıa de la semana de ocurrencia del hecho |
| **Tipo de variable** | Numérica |
| **Comentarios** | Valores con los que aparece: 1 (lunes) a 7 (domingo). |

- Quinta variable explicativa

| **Nombre de la variable** | lugar |
|---|---|
| **Descripción** | Lugar de ocurrencia del hecho |
| **Tipo de variable** | Texto |
| **Valores con los que aparece** | hogar - otro - via_publica |

- Sexta variable explicativa

| **Nombre de la variable** | arma |
|---|---|
| **Descripción** | Tipo de arma o mecanismo que se utilizó para provocar la muerte de la v´ıctima |
| **Tipo de variable** | Texto |
| **Valores con los que aparece** | ahorcamiento - arrollamiento - blanca - envenenamiento - fuego - golpes - objeto contundente - otro - quemadura - salto al vacio |

- Séptima variable explicativa

| | |
|---|---|
| **Nombre de la variable** | delito |
| **Descripción** | Este campo busca identificar los hechos de homicidios dolosos que se producen en el contexto de otro tipo de delitos |
| **Tipo de variable** | Texto |
| **Valores con los que aparece** | no - otro - robo - violacion |

- Octava variable explicativa

| | |
|---|---|
| **Nombre de la variable** | registro |
| **Descripción** | Motivo que origina el registro del hecho |
| **Tipo de variable** | Texto |
| **Valores con los que aparece** | orden_judicial - otro - denuncia - policial |

- Novena variable explicativa

| | |
|---|---|
| **Nombre de la variable** | genero |
| **Descripción** | Identidad de género de la víctima |
| **Tipo de variable** | Texto |
| **Valores con los que aparece** | mujer - trans - varon |

- Décima variable explicativa

| | |
|---|---|
| **Nombre de la variable** | edad |
| **Descripción** | Edad de la víctima |
| **Tipo de variable** | Numérica |
| **Comentarios** | La variable explicativa original **victima_edad_tr** se encontraba en tramos de 5 años (15 - 19). En la nueva variable **edad**, se tomó como edad el límite inferior de cada tramo (15). |

- Onceava variable explicativa

| | |
|---|---|
| **Nombre de la variable** | clase |
| **Descripción** | Esta variable busca identificar algunos tipos de v´ıctimas en función de la relevancia de sus categor´ıas para el análisis de los hechos |
| **Tipo de variable** | Texto |
| **Valores con los que aparece** | civil - detenido - otra_fuerza_seguridad - policia_en_servicio - policia_no_servicio - policia_no_servicio - seguridad privada |

- Variable dependiente

| | |
|---|---|
| **Nombre de la variable** | victima_relacion_inculpado |
| **Descripción** | Esta variable releva el tipo de v´ınculo de la v´ıctima con el inculpado, y se asigna a cada v´ıctima |
| **Tipo de variable** | Texto |
| **Valores con los que aparece** | relacion_familiar - relacion_no_familiar - sin_relacion |

Se debe considerar que, con el fin de obtener una mejor predicción por parte del modelo y tal como propuso Riedel (1987), se agruparon los factores de esta última variable de la siguiente manera:

| | |
|---|---|
| **relacion_familiar** | Conyuge/ pareja - Hermano/a - Hijo/a - Otros v´ınculos familiares - Padre/Madre |
| **relacion_no_familiar** | Cliente / proveedor - Empleado - Empleador - Ex conyuge / ex pareja - Otras relaciones no familiares - Socio (Relación comercial) |
| **sin_relacion** | Sin relacion |

Considerando todos los cambios descriptos anteriormente, se muestra a continuación una porción de la base de datos a modo ilustrativo:

| ´Indice | Poblacio´n | Mes | D´ıa | D´ıa Sem. | Lugar | Arma | Delito | Registro | G´enero | Edad | Clase | Relacio´n Inculpado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 288.896 | 1 | 7 | 6 | V´ıa Pu´blica | Fuego | No | Policial | Varo´n | 25 | Civil | Sin Rel. |
| 2 | 1.438 | 1 | 2 | 1 | Hogar | Ahorcamiento | No | Policial | Varo´n | 70 | Civil | Rel. Familiar |
| 3 | 288.896 | 4 | 3 | 1 | V´ıa Pu´blica | Fuego | No | Policial | Varo´n | 15 | Civil | Sin Rel. |
| 4 | 40.472 | 3 | 17 | 5 | V´ıa Pu´blica | Blanca | No | Policial | Varo´n | 40 | Detenido | Sin Rel. |
| 5 | 895 | 3 | 11 | 6 | Hogar | Fuego | No | Policial | Mujer | 40 | Civil | Rel. No Familiar |
| 6 | 36.913 | 3 | 12 | 7 | Campo | Blanca | Otro | Denuncia | Varo´n | 20 | Civil | Sin Rel. |
| 7 | 3.921 | 6 | 8 | 4 | Hogar | Fuego | No | Policial | Mujer | 5 | Civil | Rel. Familiar |
| 8 | 5.951 | 4 | 22 | 6 | Hogar | Ahorcamiento | No | Policial | Mujer | 0 | Civil | Rel. Familiar |
| 9 | 591.163 | 1 | 1 | 7 | Hogar | Blanca | No | Denuncia | Varo´n | 45 | Civil | Rel. Familiar |
| 10 | 591.163 | 1 | 5 | 4 | Comercio | Objeto Contundente | No | Denuncia | Varo´n | 35 | Civil | Rel. No Familiar |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 16 | 106.214 | 2 | 24 | 5 | Hogar | Objeto Contundente | No | Denuncia | Varo´n | *NA* | *NA* | Sin Rel. |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 7128 | 598.835 | 8 | 13 | 7 | Hogar | Quemadura | No | Policial | Mujer | 55 | Civil | Rel. Familiar |

Tabla 2: Base de datos final con mayor tamaño y ancho completo.

La base de datos, luego de su debida preparación, cuenta con 7 128 observaciones y 12 variables explicativas. Sin embargo, la misma posee datos faltantes que son indeseados para el correcto desarrollo de los modelos. En la siguiente tabla se vuelcan la cantidad de datos faltantes en cada variable explicativa:

| | |
|---|---|
| lugar | 770 |
| arma | 281 |
| delito | 195 |
| genero | 2 |
| edad | 169 |
| clase | 131 |
| **Total** | **1 548** |

Tabla 3: Cantidad de datos faltantes por variable.

Esta cantidad de datos faltantes se encuentran distribuidos en 1 392 observaciones, lo cual indica que hay 5 736 observaciones completas. Los datos faltantes no pueden permanecer en la base para el correcto desarrollo de los modelos explicativos y predictivos, por ende, se puede optar por dos alternativas: eliminar todas aquellas observaciones con datos faltantes y obtener una base de datos más reducida, o completar los datos faltantes con algún método que lo permita. A priori, pareció conveniente utilizar la base de datos más extensa posible, por ende, se decidieron evaluar los siguientes métodos para tratar los datos faltantes:

1. *Imputación de categor´ıa "faltante" para variables categóricas y valor ilógico para variables numéricas*: En este intento, para aquellas variables categóricas (*lugar*, *arma*, *delito*, *genero* y *clase*), se imputó una nueva categor´ıa denominada "faltante". A su vez, para la única variable numérica incompleta (*edad* ), se imputó un valor ilógico, en este caso se utilizó −1 (menos uno).

2. *Imputación de categor´ıa "faltante" para variables categóricas y mediana para variables numéricas*: Nuevamente se imputó una categor´ıa "faltante" para las variables categóricas, pero para la variable *edad*, se utilizó la mediana de los valores disponibles. Además, se añadió una variable indicadora que adoptaba un valor *TRUE*, cuando la observación hab´ıa recibido un valor imputado, y un valor *FALSE* cuando la observación estaba completa y no fue imputada.

3. *Imputación con el algoritmo MICE:* En último lugar, se realizaron imputación a los datos faltantes a partir del método MICE (multivariate imputation by chained equations). El mismo ofrece una serie de herramientas para la imputación de datos faltantes dependiendo de la naturaleza de las observaciones y las relaciones entre las variables a imputar. MICE crea una serie de *m* bases de datos imputadas, que difieren únicamente entre s´ı en los valores faltantes. En cada base de datos imputada, se reemplazan los valores faltantes por valores predichos a partir del resto de las variables completas, usando distintos modelos predictivos según el tipo de variable. A partir de cada base de datos imputada, se realiza una predicción usando el modelo predictivo propuesto y se calcula un promedio de dichas predicciones. (Buuren et al., 2011)

Entre todas las alternativas del tratamiento de datos faltantes, se optó por eliminarlos en los modelos explicativos y predictivos, y reemplazarlos por una categor´ıa denominada *desconocido* en el análisis exploratorio. As´ı, la base de datos con los registros incompletos eliminados resultó de 5 736 observaciones, con 11 variables explicativas y 1 variable respuesta.

### 4.1.3. Descripción General

Los datos usados cuentan con un total de 7 128 observaciones, cada una con 11 variables explicativas y 1 variable a analizar (*victima relacion inculpado*).

Del total de las victimas identificadas, un 21, 8 % fueron mujeres, un 77, 9 % fueron varones y 0, 98 % fueron transexuales. El 21, 1 % de las v´ıctimas ten´ıan entre 0-20 años, el 37, 1 % entre 20-40 años, el 13 % entre 40-60 años y el 28, 8 % más de 60 años. El 78, 1 % de los homicidios no fueron en ocasión de otro delito, mientras que un 0, 36 % fueron en ocasión de violación, un 18, 7 % de robo y un 2, 84 % en otro tipo de delito. En cuanto a los v´ınculos victima-inculpado, el 26, 5 % de los inculpados manten´ıan una relación familiar, el 33, 3 % una relación no familiar y el restante 40, 2 % era sin relación.

## 4.2. Estrategia de Análisis Exploratorio

A partir de los datos recogidos, se realizaron una serie de comparaciones entre las distintas variables y la variable respuesta (*victima_relacion_inculpado*). Para eso, se tomó un gráfico de la frecuencia de cada tipo de relación de acuerdo a los distintos factores posibles de las variables independientes más relevantes (*poblacion*, *dia_sem*, *lugar*, *arma*, *delito*, *genero* y *edad*).
En cada gráfico, la amplitud de clase está definida por los factores de la variable analizada. Es decir, si tomamos la variable *dia_sem* como ejemplo, vemos que el gráfico tiene 7 barras verticales: una por cada factor (cada día de la semana). En el caso de las variable numéricas, la amplitud de clase de *poblacion* es de 100 000 habitantes, y la de *edad* es de 5 años.

Con el objetivo de tener un panorama más completo de la información, se optó por no eliminar las observaciones incompletas en la confección de los gráficos. Para eso, se tuvieron en cuenta los datos faltantes y se agregaron (cuando fuera necesario) como una categoría nueva catalogada "desconocida".

Estas representaciones visuales de la base de datos permiten observar la distribución de los factores en las distintas categorías de relación, lo cual muestra las tendencias en las características de los homicidios en Argentina. A su vez, este análisis posibilita la detección de desequilibrios entre las categorías de la variable respuesta, es decir, que alguna sea mucho más "pequeña"que las otras. Estas características deterioran la capacidad predictiva del modelo, por lo cual es importante utilizar una base de datos bien estructurada y con categorías equilibradas. Una vez que se realiza este análisis descriptivo y se obtienen un mayor conocimiento acerca de los datos, se puede avanzar hacia el desarrollo de los modelos explicativos y predictivos.

## 4.3. Modelado Explicativo

El primer objetivo de este estudio es describir y demostrar la existencia de patrones de correlación entre factores del homicidio y el vínculo víctima-victimario en homicidios dolosos en Argentina. Para eso, es conveniente desarrollar algún modelo explicativo que permita analizar cada variable independiente y su influencia en los distintos posibles resultados de la variable respuesta. La ventaja de este enfoque consiste en poder analizar el impacto individual de cada variable de manera aislada, manteniendo todas las otras variables explicativas fijas

En líneas generales, los modelos que sueles ser mejores para realizar predicciones (random forest, redes neurales), no evidencian de forma clara las relaciones entre las variables y los resultados. Como plantean Haddouchi y Berrado (2024), los modelos resultantes de random forest se consideran una "caja negra"debido a sus numerosos árboles de decisión profundos, obtener una visión clara de todo el proceso que conduce a las decisiones finales explorando cada árbol de decisión es complicado, si no imposible. De esta manera, no son los modelos óptimos para realizar un análisis explicativo del fenómeno que se quiere predecir y entender. Por otro lado, algunos modelos que no destacan por su capacidad predictiva son mejores para entender la naturaleza e influencia de las variables, como las regresiones lineales o logísticas. En nuestro caso, resulta más útil usar un modelo con mejores características explicativas que predictivas para realizar una interpretación de las variables y la manera en que afectan el vínculo víctima-victimario en homicidios. Por este motivo, se utilizó un modelo logístico multinomial.

### 4.3.1. Modelo Log´ıstico Multinomial

El modelo log´ıstico plantea una función lineal para la probabilidad de cada clase y luego, según un corte de probabilidad aplicado, clasifica la variable respuesta a predecir. La estimación se hace por máxima verosimilitud aplicando el algoritmo de Newton & Raphson, el cual asegura la consistencia y normalidad asintótica del estimador.

Este modelo posee la desventaja de que no se puede utilizar para variables de respuesta discretas múltiples y solo permite que sean binarias. Por ende, debido a que en el caso analizado la variable respuesta tiene tres factores posibles, se debe utilizar un modelo alternativo conocido como la **regresión log´ıstica multinomial**, que generaliza el método de regresión log´ıstica para problemas con más de dos posibles resultados discretos.

Este modelo define a $J$ como el número de categor´ıas de la variable $Y$ y a $\{\pi_1, \cdots, \pi_J\}$ como las probabilidades de respuesta, cumpliendo que $\sum_j \pi_j = 1$. Con $n$ observaciones independientes, la distribución de probabilidad para el número de resultados en las $J$ categor´ıas es la multinomial. Esta especifica la probabilidad de cada posible manera en que las $n$ observaciones pueden distribuirse entre las $J$ categor´ıas.

Los modelos logit para variables de respuesta nominal emparejan cada categor´ıa con una *categor´ıa de referencia*. Dado que la respuesta cae en la categor´ıa $j$ o en la categor´ıa $J$, esta es la *razón logar´ıtmica de probabilidades* (log-odds) de que la respuesta sea $j$. Por ejemplo, en nuestro caso con $J = 3$, el modelo utiliza $\log(\pi_1/\pi_3)$ y $\log(\pi_2/\pi_3)$. El modelo logit con una variable predictora $x$ se expresa como:

$$\log\left(\frac{\pi_j}{\pi_J}\right) = \alpha_j + \beta_j x, \quad j = 1, \ldots, J-1 \tag{1}$$

El modelo log´ıstico multinomial también puede expresarse en términos de las *probabilidades de respuesta* de la siguiente manera:

$$\pi_j = \frac{e^{\alpha_j + \beta_j x}}{\sum_{h=1}^{J} e^{\alpha_h + \beta_h x}}, \quad j = 1, \ldots, J \tag{2}$$

El denominador es el mismo para cada probabilidad y asegura que la suma de las probabilidades para todas las categor´ıas sea 1. En esta formulación, los *parámetros* $\alpha_j$ y $\beta_j$ representan los efectos espec´ıficos para cada categor´ıa. Cuando todos los parámetros se igualan a cero, la expresión resulta en una distribución uniforme de probabilidades, es decir, cada categor´ıa tiene la misma probabilidad (Agresti, 2007).

Los elementos extra´ıdos del modelo explicativo que permitirán analizar los homicidios dolosos son dos. Por un lado, se considerarán los coeficientes de regresión o estimaciones de cada variable, $\beta_j$. Por otro lado, se utilizarán los efectos marginales promedio sobre la probabilidad de que la variable respuesta sea cada una de las tres relaciones posibles. Este valor indica la variación en la probabilidad de cada relación cuando var´ıa cada variable, manteniendo a las otras constantes.

Dado que en los modelos log´ısticos multinomiales los efectos marginales no son iguales entre individuos (ya que dependen de las caracter´ısticas particulares de cada observación i), se calculan de forma individual y luego se promedian para obtener un valor global. La fórmula para el efecto marginal de la variable $x_k$ sobre la probabilidad de que la respuesta sea la categor´ıa $j$ para el individuo $i$ es: :

$$\frac{\partial \pi_{ij}}{\partial x_{ik}} = \pi_{ij} \left( \beta_{jk} - \sum_r \pi_{ir} \beta_{rk} \right) \quad (3)$$

Luego, el efecto marginal promedio se calcula como el promedio de estos valores individuales para todos los individuos *i*. Los efectos marginales fueron calculados con la ayuda de Excel.

En nuestro caso, para realizar un análisis explicativo más claro y en función de los datos obtenidos en el análisis exploratorio, se realizaron algunas variaciones a la base de datos a utilizar. En primer lugar, en base a los gráficos de frecuencia realizados de cada variable, se mantuvieron las variables independientes que mostraban alguna tendencia entre sus factores: *población*, *dia_sem*, *lugar*, *arma*, *delito*, *genero* y *edad*. Las variables numéricas (*población* y *edad*) se adaptaron tal que *población* esta expresada en 100 000 habitantes, y *edad* está expresada cada 10 años. La variable *arma* fue reducida en sus factores a los siguientes 3: arma_fuego, arma_blanca y sin_arma. Por último, las variables restantes fueron modificadas para convertirlas en binarias, lo que permite realizar un análisis más claro del impacto de cada variable independiente en la variable respuesta. Sus cambios fueron:

- dia_sem: se la renombró como "fin_de_semana", donde los días del lunes al jueves adoptaron el valor 0 y los días del viernes al domingo adoptaron el valor 1.
- lugar: se la renombró como "hogar", donde los homicidios ocurridos fuera del hogar adoptaron el valor 0 y los que fueron dentro del hogar adoptaron el valor 1.
- delito: los homicidios ocurridos en ocasión de robo u otro delito adoptaron el valor 1 y los casos en los que no hubo otro delito adoptaron el valor 0.
- genero: se la renombró "mujer", donde los homicidios a mujeres adoptaron el valor 1 y los homicidios a hombres adoptaron el valor 0. Los casos que involucran transexuales fueron eliminados para este análisis debido a que representan una porción muy pequeña de los datos.

Luego, a partir del paquete **mlogit** se definió el modelo logístico multinomial, donde se establece cuál es la variable respuesta y cuáles las variables explicativas. Para cada variable independiente se determinó un factor de referencia, siendo sin_arma para *arma* y el valor 0 para las restantes. Además, se determinó "sin_relacion" como factor de referencia del modelo. Esto implica que los coeficientes de regresión de cada factor de cada variable indican qué tanto más o menos probable es que el vínculo sea de "relacion_familiar" o "relacion_no_familiar" comparado a "sin_relacion".

Cada coeficiente es testeado con la *prueba de Wald*, utilizando un valor de significancia de 0,05. Aquellos significativos validan la existencia de una relación entre estos y la variables respuesta, que es luego interpretada.

## 4.4. Modelado Predictivo

El segundo objetivo de este estudio es desarrollar un modelo capaz de predecir con cierto grado de significancia el vínculo víctima-victimario en homicidios dolosos en Argentina a partir de factores propios del homicidio. Con este fin, se busca realizar un modelado predictivo con los datos disponibles. El objetivo de la modelización es encontrar un modelo parsimonioso que ajuste bien a los datos. Por "parsimonioso" se entiende, según la *Lex Parsimoniæ*, a aquel modelo que, frente a otro que represente de igual manera la realidad, lo haga de la forma más simple. En este caso, debido a la naturaleza de los datos, se desarrolla una clasificación supervisada a través de métodos de predicción discreta. Esto quiere decir que frente a nuevas observaciones sin variable respuesta se las debe clasificar entre varios grupos de unidades. Para esto se desean

hallar las variables que permiten discriminar o discernir de la mejor manera. Algunos ejemplos de modelos predictivos discretos son el reconocimiento de caracteres de escritura manual, la discriminación de mails en deseados, spam o notificación, la identificación de fraude en tarjetas de crédito a partir de las características de la operación y la historia del cliente, entre otros.

En este caso de estudio, se desea hallar un modelo que frente a las características de un homicidio doloso pueda identificar la relación entre la víctima y el inculpado. Debido a que la variable respuesta puede adoptar tres categorías ("relacion familiar", "relacion no familiar" y "sin_relacion"), el modelo debe ser discreto múltiple y no binario o continuo. Algunos modelos que se pueden utilizar son K-Nearest Neighbours, Naïve Bayes, Random Forest, Neural Network, Logístico Multinomial, entre otros. Contrario a lo mencionado en el apartado anterior (subsección 4.3), en este segundo objetivo es conveniente utilizar algoritmos con mejores capacidades predictivas. En general, estos algoritmos no evidencian de forma tan clara las relaciones entre las variables y los resultados. Considerando esto y en base a resultados obtenidos en estudios propios anteriores, se optó por utilizar modelos de *Gradient Boosting*, los cuales emplean una serie de arboles de clasificación en sus implementaciones.

### 4.4.1. Gradient Boosting

La técnica de *Gradient Boosting* en *machine learning* se basa en combinar las predicciones de varios modelos débiles para obtener un solo modelo más preciso. Se considera modelo débil a aquel que predice ligeramente mejor que adivinar al azar y en general, para estos modelos se suelen utilizar árboles de decisión pequeños. Luego, se combinan decenas o cientos de estos modelos que se ajustan de forma adaptativa para reducir el sesgo. Esto quiere decir que cada árbol intenta corregir los errores del árbol anterior para así poder alcanzar predicciones con mayor capacidad predictiva (Hastie, Tibshirani, & Friedman, 2009).

Los modelos de *Gradient Boosting* poseen ciertos hiperparámetros que se deben ajustar para obtener los mejores resultados posibles. Entre estos se encuentran:

1. *Máxima profundidad (max.prof)*: La cantidad de niveles de cada modelo débil estará limitada por este hiperparámetro. Si el mismo, por ejemplo, toma un valor de 3, todos los árboles de decisión podrán adoptar hasta 3 niveles, incluyendo los nodos terminales. Con una mayor profundidad de los árboles, aumenta el costo computacional y la complejidad del modelo. Se debe tener en cuenta que una profundidad máxima cercana a 3 ayudará a prevenir el *overfitting* y que no es recomendable utilizar más de 10 niveles.

2. *Cantidad de árboles (n_arb)*: El tercer hiperparámetro indica la cantidad de modelos débiles, en este caso árboles de decisión, que tendrá el modelo. Con una mayor cantidad de árboles, se obtiene mayor robustez y rendimiento pero se aumenta la complejidad y la probabilidad de *overfitting*. Para evitar esto se suelen utilizar bajas tasas de aprendizaje. Se suelen usar cantidades de árboles cercanas a los 20, 50, 100, 500, 1000, dependiendo de la tasa de aprendizaje a utilizar.

3. *Tasa de aprendizaje (eta)*: Este hiperparámetro controla la contribución de cada modelo débil. Los valores más pequeños disminuyen el peso que tiene cada modelo en el ensamble final. En consecuencia, si se utiliza un valor pequeño, se precisarán más modelos débiles y más entrenamiento, pero se obtendrá un resultado final más potente y menos propenso a *overfitting*. Los valores que se suelen utilizar son 0,1 , 0,05 , 0,01 y 0,001.

El algoritmo *Gradient Boosting* se ha implementado en varias librerías de *Python* entre las cuales se destacan *eXtreme Gradient Boosting (XGBoost)*, *Light Gradient Boosting Machine (LGBM)* y *Categorical Boosting (CatBoost)*. En este trabajo se evaluarán los primeros dos mencionados

para abordar el segundo objetivo propuesto: *XGBoost* y *LGBM*. Una de las mayores diferencias entre estas librer´ıas es que *XGBoost* realiza el crecimiento de los árboles nivel a nivel, mientras que *LGBM* lo hace hoja por hoja. Esto conlleva a que en *LGBM* los árboles tengan estructuras más irregulares, con gran profundidad pero baja cantidad de hojas, por ejemplo. A su vez, se obtienen menores tiempos de entrenamiento lo que lo hace mejor para trabajar con grandes bases de datos que el *XGBoost*. Por otro lado, el algoritmo *LGBM* es más propenso a tener *overfitting* que el *XGBoost* (Florek et al., 2023). Para el caso espec´ıfico a tratar en este trabajo, predicción del v´ınculo v´ıctima-victimario en los homicidios dolosos, se desarrollaran ambos algoritmos y se los evaluará para elegir el que mejor se ajuste a la realidad.

### 4.4.2. Criterio de Elección del Modelo

Con el fin de poder medir el nivel predictivo del modelo y evaluar su fiabilidad, se dividió aleatoriamente la base de datos en 3 grupos: *Muestra de aprendizaje, Muestra de prueba Muestra de validación.* Los tamaños de estas muestras fueron del 70 %, 15 % y 15 % de las observaciones, respectivamente. Dado que la base de datos cuenta con 5 736 observaciones, la *Muestra de aprendizaje* resultó con un tamaño de 4 016 observaciones, la *Muestra de prueba* de 859 observaciones y la *Muestra de validación* de 861 observaciones.

Para ajustar el modelo correctamente, se debe elegir los hiperparámetros del mismo siguiendo una serie de pasos. En primer lugar, se definen 4 valores posibles para la *máxima profundidad* (2, 3, 5 y 10), 3 valores posibles para la *cantidad de árboles* (20, 50 y 100) y 4 valores posibles para la *tasa de aprendizaje* (0,1 , 0,05 , 0,01 y 0,001). A partir de estos posibles hiperparámetros se toman las $4 \cdot 3 \cdot 4 = 48$ combinaciones y se define un modelo para cada combinación de parámetros. Con cada uno de ellos, se lo entrena a partir de la *muestra de aprendizaje* y se evalúa su performance utilizando la *muestra de validación.* De entre los 48 modelos evaluados se selecciona aquel con mejores indicadores. A este modelo definitivo, se lo entrena con la *muestra de aprendizaje* y *muestra de validación* unificadas, y se evalúa su capacidad predictiva con la *muestra de prueba,* cotejando las predicciones obtenidas con las observaciones reales. Esta manera de seleccionar los hiperparámetros con la *muestra de validación* y *muestra de prueba* busca reportar la capacidad predictiva en una base de datos aún no vista.

| # | max_prof | n_arb | eta | # | max_prof | n_arb | eta |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 20 | 0,100 | 25 | 2 | 20 | 0,010 |
| 2 | 3 | 20 | 0,100 | 26 | 3 | 20 | 0,010 |
| 3 | 5 | 20 | 0,100 | 27 | 5 | 20 | 0,010 |
| 4 | 10 | 20 | 0,100 | 28 | 10 | 20 | 0,010 |
| 5 | 2 | 50 | 0,100 | 29 | 2 | 50 | 0,010 |
| 6 | 3 | 50 | 0,100 | 30 | 3 | 50 | 0,010 |
| 7 | 5 | 50 | 0,100 | 31 | 5 | 50 | 0,010 |
| 8 | 10 | 50 | 0,100 | 32 | 10 | 50 | 0,010 |
| 9 | 2 | 100 | 0,100 | 33 | 2 | 100 | 0,010 |
| 10 | 3 | 100 | 0,100 | 34 | 3 | 100 | 0,010 |
| 11 | 5 | 100 | 0,100 | 35 | 5 | 100 | 0,010 |
| 12 | 10 | 100 | 0,100 | 36 | 10 | 100 | 0,010 |
| 13 | 2 | 20 | 0,050 | 37 | 2 | 20 | 0,001 |
| 14 | 3 | 20 | 0,050 | 38 | 3 | 20 | 0,001 |
| 15 | 5 | 20 | 0,050 | 39 | 5 | 20 | 0,001 |
| 16 | 10 | 20 | 0,050 | 40 | 10 | 20 | 0,001 |
| 17 | 2 | 50 | 0,050 | 41 | 2 | 50 | 0,001 |
| 18 | 3 | 50 | 0,050 | 42 | 3 | 50 | 0,001 |
| 19 | 5 | 50 | 0,050 | 43 | 5 | 50 | 0,001 |
| 20 | 10 | 50 | 0,050 | 44 | 10 | 50 | 0,001 |
| 21 | 2 | 100 | 0,050 | 45 | 2 | 100 | 0,001 |
| 22 | 3 | 100 | 0,050 | 46 | 3 | 100 | 0,001 |
| 23 | 5 | 100 | 0,050 | 47 | 5 | 100 | 0,001 |
| 24 | 10 | 100 | 0,050 | 48 | 10 | 100 | 0,001 |

Tabla 4: Combinaciones de los posibles hiperparámetros

La evaluación del modelo se debe realizar con parámetros que permitan analizar el ajuste de las predicciones con la realidad. En este sentido, dos aspectos distintos entran a formar parte típicamente del estudio de fiabilidad de un modelo. Por un lado, el sesgo entre la variable respuesta predicha y la variable respuesta observada, es decir, la tendencia del modelo a dar consistentemente el mismo error. Por el otro, la concordancia entre las variables mencionadas, que refleja hasta qué punto las predicciones coinciden con la realidad (López de Ullibarri Galparsoro & Pita Fernández, 2001). La manera de poder abordar estos parámetros depende de la naturaleza de los datos a estudiar. En este trabajo se utilizarán tres indicadores para evaluar los modelos propuestos: acierto general, $F_1$-score y kappa de Cohen. Cada uno de ellos se calcula a partir de la matriz de confusión del modelo, un método de visualización para los resultados del algoritmo clasificador, reflejado en la Tabla 5.

| | | Clase real | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **relacion_familiar** | **relacion_no_familiar** | **sin_relacion** | Total |
| Clase predicha | **relacion_familiar** | $x_{11}$ | $x_{12}$ | $x_{13}$ | $X_1$ |
| | **relacion_no_familiar** | $x_{21}$ | $x_{22}$ | $x_{23}$ | $X_2$ |
| | **sin_relacion** | $x_{31}$ | $x_{32}$ | $x_{33}$ | $X_3$ |
| | Total | $X_{.1}$ | $X_{.2}$ | $X_{.3}$ | $N$ |

Tabla 5: Matriz de confusión para la variable respuesta predicha.

1. Acierto general ($AG$): mide la proporción de predicciones correctas sobre el total de predicciones realizadas. Es un indicador simple e intuitivo, pero puede ser engañosos cuando una clase (factor) es mucho más frecuente que otra. En nuestro caso, las clases están relativamente balanceadas, con una distribución de 2 426, 1 916 y 1 394 observaciones entre los tres tipos de vínculos. Se calcula a partir de:

$$AG = \frac{x_{11} + x_{22} + x_{33}}{N} \tag{4}$$

2. $F_1$-score: mide la media armónica entre la precisión y la sensibilidad. Es un indicador que toma en consideración la sensibilidad y la precisión y es particularmente relevante en casos donde los falsos negativos y falsos positivos tienen consecuencias a tomar en cuenta. En este caso, donde la variable respuesta tiene 3 factores, es necesario calcular la media armónica de cada clase y realizar luego un promedio entre estos 3 valores ($F_1$ macro). Se a calcula a partir de:

$$F_{1.rel.fam} = 2 \cdot \frac{\frac{x_{11}}{X_1} \cdot \frac{x_{11}}{X_{.1}}}{\frac{x_{11}}{X_1} + \frac{x_{11}}{X_{.1}}} \tag{5}$$

$$F_{1.rel.no.fam} = 2 \cdot \frac{\frac{x_{22}}{X_2} \cdot \frac{x_{22}}{X_{.2}}}{\frac{x_{22}}{X_2} + \frac{x_{22}}{X_{.2}}} \tag{6}$$

$$F_{1.sin.rel} = 2 \cdot \frac{\frac{x_{33}}{X_3} \cdot \frac{x_{33}}{X_{.3}}}{\frac{x_{33}}{X_3} + \frac{x_{33}}{X_{.3}}} \tag{7}$$

$$F_{1.macro} = \frac{F_{1.rel.fam} + F_{1.rel.no.fam} + F_{1.sin.rel}}{3} \tag{8}$$

3. Kappa de Cohen ($\kappa$): este coeficiente es más robusto que el acierto general debido a que también ajusta el efecto del azar en la proporción del acierto observado. Según Cantor (1995), el cual se basa en lo definido por Cohen en 1960, el índice *kappa* se toma de la siguiente forma:

$$\kappa = \frac{\pi_o - \pi_e}{1 - \pi_e} \tag{9}$$

Donde $\pi_0$ es la proporción de coincidencias entre la clase real y la predicha, y $\pi_e$ es la proporción esperada de coincidencias debido al azar. Estas probabilidades se calculan de la siguiente manera:

$$\pi_o = \frac{x_{11} + x_{22} + x_{33}}{N} \tag{10}$$

$$\pi_e = \frac{X_1}{N} \cdot \frac{X_{.1}}{N} + \frac{X_2}{N} \cdot \frac{X_{.2}}{N} + \frac{X_3}{N} \cdot \frac{X_{.3}}{N} \tag{11}$$

La ventaja de este índice por sobre la simple concordancia (porcentaje de observaciones bien clasificadas) es que considera la concordancia por azar y *"penaliza"* en consecuencia. A modo ilustrativo, se tomaran dos ejemplos de posibles matrices de confusión de dos factores:

| | | Clase real | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **1** | **0** | Total |
| Clase predicha | **1** | 10 | 80 | 90 |
| | **0** | 0 | 10 | 10 |
| | Total | 10 | 90 | 100 |

Tabla 6: Matriz de confusión caso A.

| | | Clase real | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **1** | **0** | Total |
| Clase predicha | **1** | 80 | 10 | 90 |
| | **0** | 10 | 0 | 10 |
| | Total | 90 | 10 | 100 |

Tabla 7: Matriz de confusión caso B.

En el *Caso A* la concordancia es de 20 % mientras que en el *Caso B* es de 80 %, con lo cual se podría concluir que el segundo modelo se ajusta mejor a la realidad. Sin embargo al observar las probabilidades esperadas por efecto del azar, el resultado cambia. A continuación se calcula el índice *kappa* para ambas situaciones:

Caso A $\pi_o = \frac{10+10}{100} = 0,2$ $\pi_e = \frac{90}{100} \cdot \frac{10}{100} + \frac{10}{100} \cdot \frac{90}{100} = 0,18$ $\kappa = \frac{0,2-0,18}{1-0,18} = 0,024$

Caso B $\pi_o = \frac{80+0}{100} = 0,8$ $\pi_e = \frac{90}{100} \cdot \frac{90}{100} + \frac{10}{100} \cdot \frac{10}{100} = 0,82$ $\kappa = \frac{0,8-0,82}{1-0,82} = -0,111$

En los ejemplos provistos, se puede observar que el modelo con menor concordancia obtiene un índice *kappa* mayor. Incluso el segundo modelo, cuya concordancia es significativamente elevada, obtuvo un valor negativo de *kappa*. En conclusión se puede considerar al índice *kappa* un coeficiente robusto y de mayor utilidad para evaluar los resultados del modelo.

A partir de estos 3 indicadores se logra obtener una evaluación integral de los modelos analizados. Se selecciona el modelo que obtenga los valores más altos para los indicadores descriptos, suponiendo que será el que mejor se ajuste a la realidad.

# 5. Resultados

## 5.1. Análisis Exploratorio

Los resultados de los gráficos de frecuencia de cada variable explicativa según el tipo de v´ınculo v´ıctima-victimario se presentan a continuación. De los mismos es posible esbozar conclusiones generales acerca de la relación entre la variable explicativa y el v´ınculo.

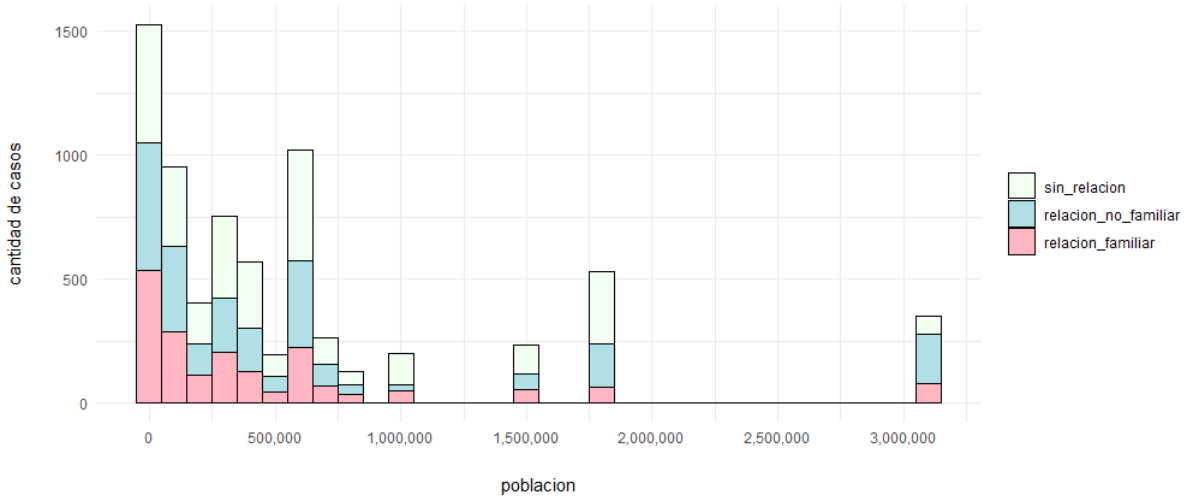



Figura 1: Histograma de la variable *poblacion* con respecto al vinculo v´ıctima-inculpado.

En lo que respecta a la población del lugar de homicidio, en la Figura 1 se puede notar que en localidades con menor población, el porcentaje de homicidios causados por un familiar es mayor que en localidades con mayor población. Además, el grueso de los homicidios está concentrado en las localidades de menor población. Se reconoce, de derecha a izquierda, las barras correspondientes a los homicidios ocurridos en la Ciudad de Buenos Aires, La Matanza, Córdoba y Rosario, respectivamente. Cabe destacar que en las últimas 3 ciudades, aproximadamente la mitad de los homicidios tienen v´ınculo **sin relación**.

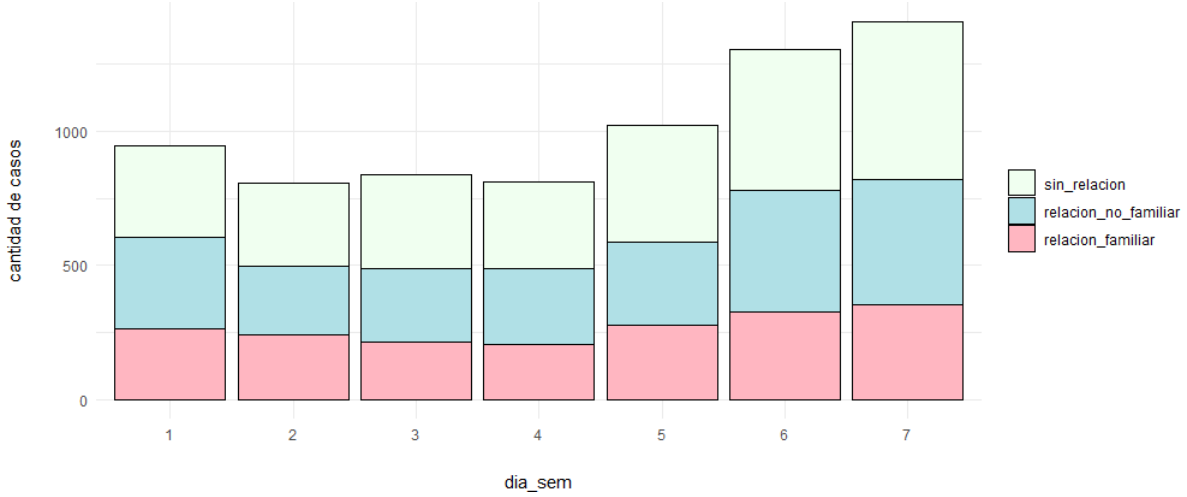



Figura 2: Gráfico de barras de la variable *dia_sem* con respecto al vinculo v´ıctima-inculpado.

En la Figura 2, 1 representa al lunes y 7 a domingo. Se observa que los fines de semana ocurre una mayor cantidad de homicidios, siendo el domingo el d´ıa con más casos registrados, seguido por el sábado y luego por el viernes. De los d´ıas de semana, el lunes es el que más casos tiene

y el martes el que menos tiene. No se identifican relaciones muy claras respecto a los v´ınculos v´ıctima-victimario en cada d´ıa.

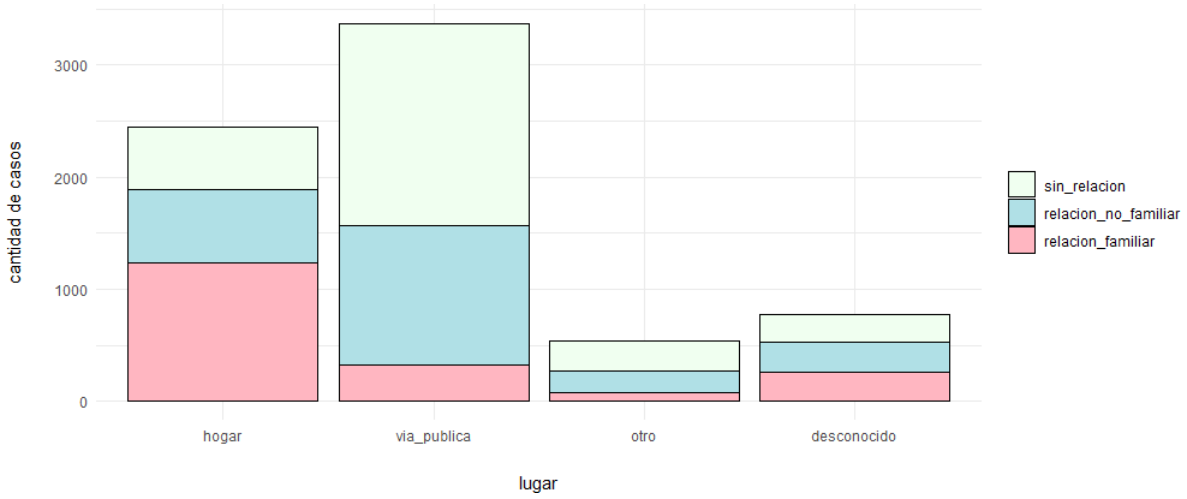



Figura 3: Gráfico de barras de la variable *lugar* con respecto al vinculo v´ıctima-inculpado.

Como indica la Figura 3, la mayor parte de los homicidios registrados fueron en la v´ıa pública y, en segundo lugar, en domicilios particulares. Es evidente la tendencia al homicidio de desconocidos en la v´ıa pública, mientras que el grueso de los homicidios en hogares fueron causados por familiares. Cabe destacar el bajo porcentaje de homicidios familiares en la v´ıa pública y el alto porcentaje relativo de homicidios causados por conocidos no familiares.

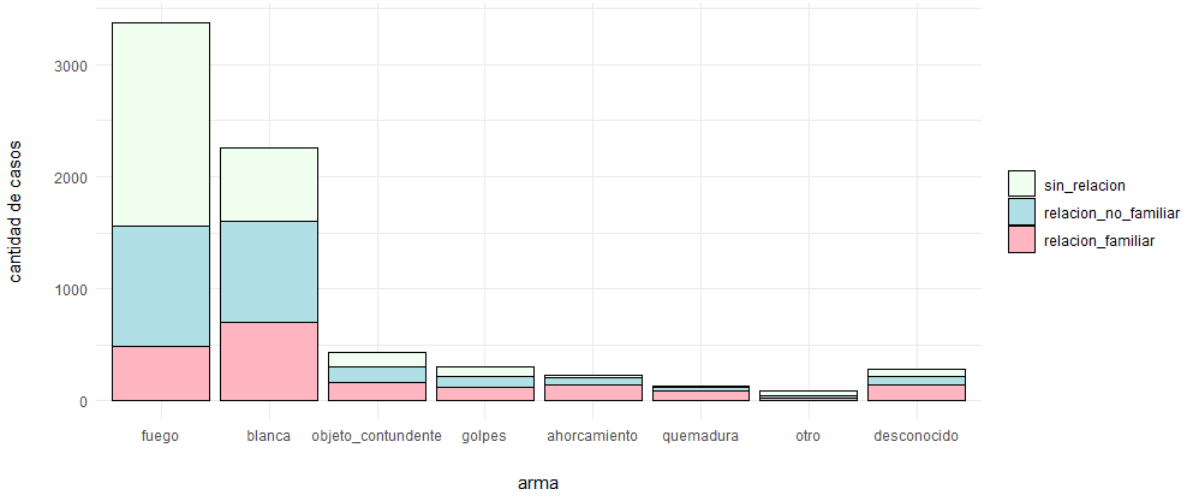



Figura 4: Gráfico de barras de la variable *arma* con respecto al vinculo v´ıctima-inculpado.

En cuanto a las armas utilizadas, se observa en la Figura 4 que la mayor cantidad de homicidios fueron cometidos con armas de fuego y en segundo lugar con armas blancas. Aquellos homicidios realizados con un arma de fuego corresponden mayoritariamente al v´ınculo **sin_relacion**, con más de la mitad de los casos. Por otro lado, los homicidios cometidos por un familiar son con mayor frecuencia con un arma blanca que con cualquier otra arma. Los homicidios ocasionados con un objeto contundente o a golpes presentan una distribución relativamente equitativa entre las tres categor´ıas de v´ınculo posibles. Sin embargo, en el caso de ahorcamiento y quemadura, el v´ınculo **relacion_familiar** parecer´ıa ser más frecuente que los otros, superando la mitad de los casos.

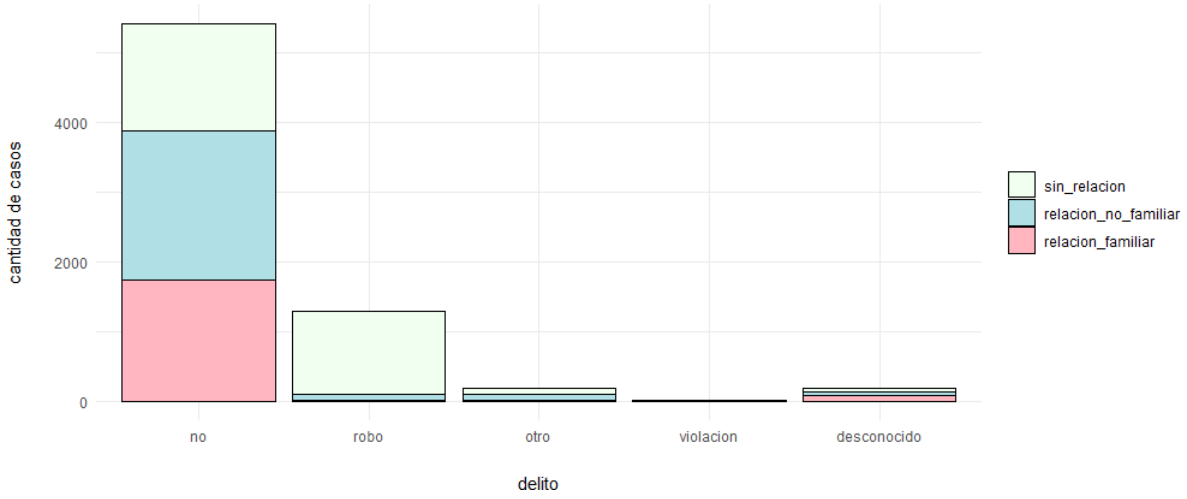



Figura 5: Gráfico de barras de la variable *delito* con respecto al vinculo v´ıctima-inculpado.

Los homicidios que no fueron realizados en el contexto de otro delito presentan aproximadamente frecuencias similares para las tres categor´ıas de v´ınculo. No obstante, este no es el caso para cuando el homicidio se comete junto a un robo. En estas situaciones el v´ınculo que prima por sobre los otros es **sin_relacion**, tomando casi la totalidad de los casos. En los casos en los que el homicidio fue cometido por un familiar, este se presenta casi totalmente en la ausencia de cualquier otro delito (Figura 5).

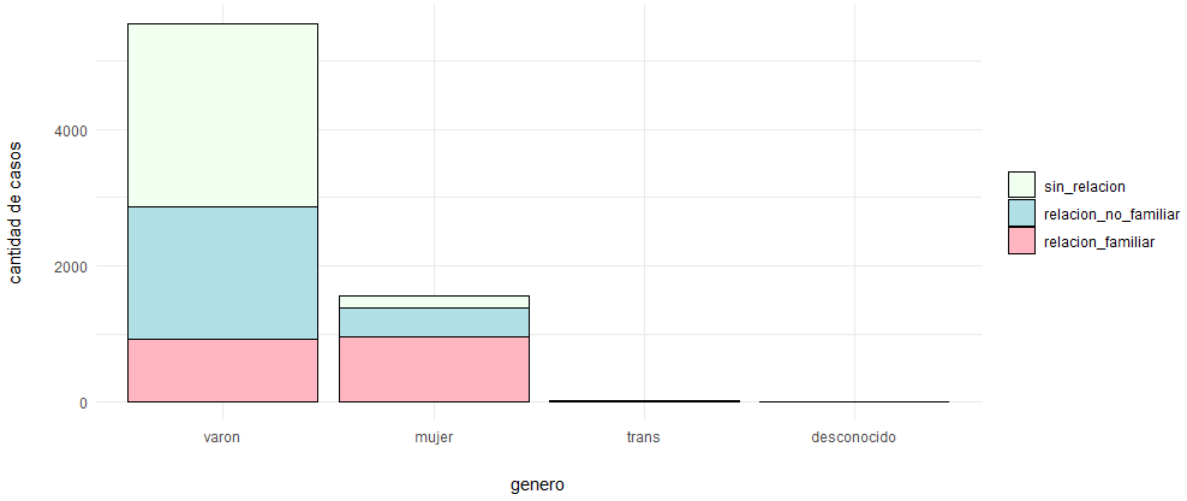



Figura 6: Gráfico de barras de la variable *genero* con respecto al vinculo v´ıctima-inculpado.

En cuanto al genero de las v´ıctimas, se observa en la Figura 6 que en la mayor´ıa de los casos es varón, en cuya categor´ıa predominan los homicidios de v´ınculo **sin_relacion**. Por otro lado, más de la mitad de las mujeres asesinadas son v´ıctimas de algún familiar. A su vez, la cantidad total de homicidios con v´ınculo **relacion_familiar** son aproximadamente iguales en varones que en mujeres. En relación a la distribución de casos por genero de los otros v´ınculos, ambos tienen ampliamente mayor cantidad en la categor´ıa **varón** por sobre **mujer**. Por último, los homicidios hacia las personas trans representan una cantidad casi insignificante de casos.

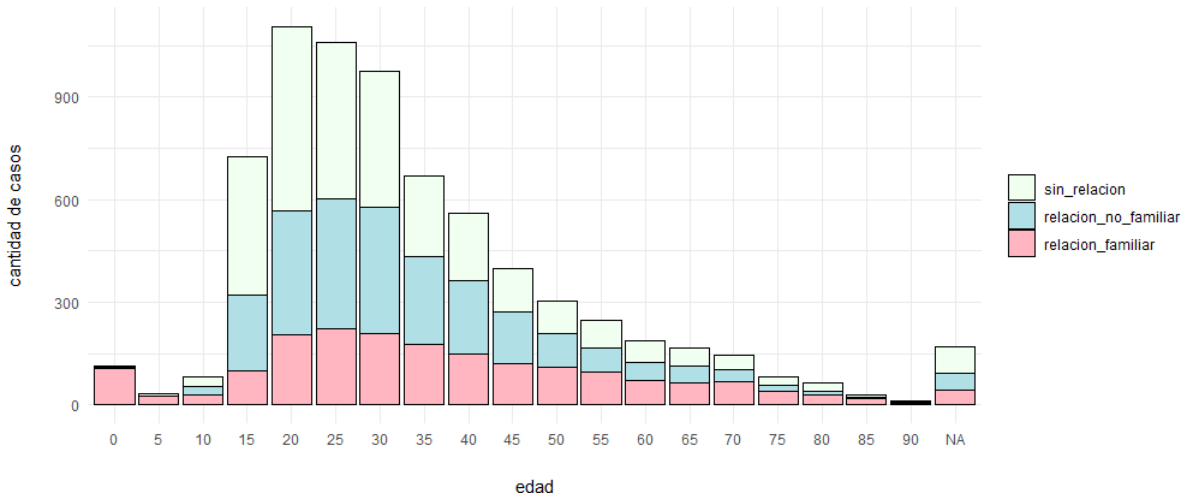



Figura 7: Gráfico de barras de la variable *edad* con respecto al vinculo v´ıctima-inculpado.

La edad de las v´ıctimas se encuentra concentrada principalmente entre los 15 y los 35 años, con el rango etario de los 20 años siendo la edad con más v´ıctimas (Figura 7). A partir de los 20 años, siempre disminuye la cantidad de homicidios registrados a medida que la edad es mayor. Cabe destacar que en homicidios de criaturas menores a los 10 años, prácticamente la totalidad de los v´ınculos son de clase **relación_familiar**. A partir de los 65 años, el porcentaje de homicidios por familiares es cada vez mayor sobre el total de los casos, mientras que entre los 15 y los 30 años, la mayor parte de los v´ınculos son **sin_relacion**.

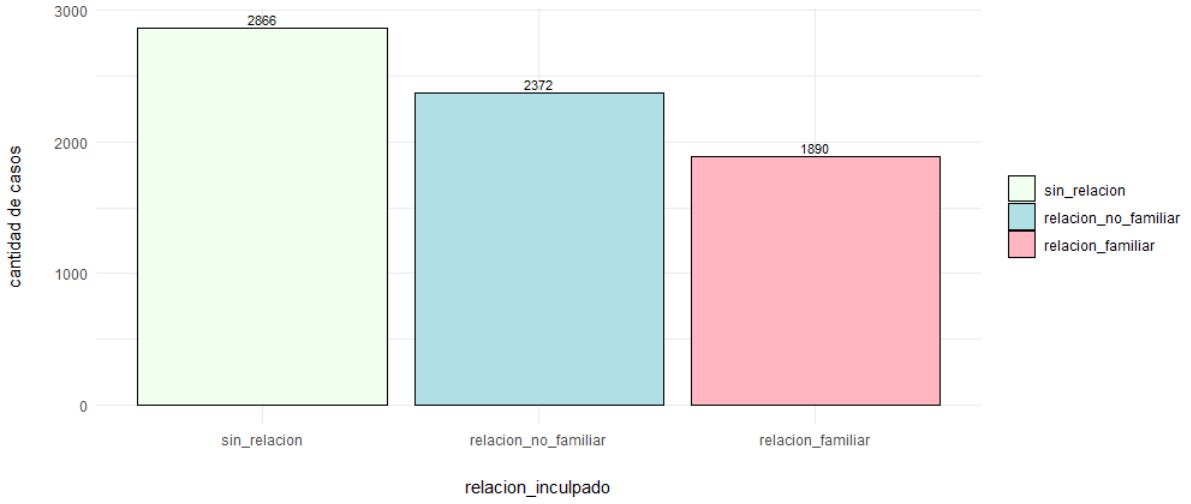



Figura 8: Gráfico de barras de la variable *relacion_inculpado* con respecto al vinculo v´ıctima-inculpado.

Por último, vemos en la Figura 8 que la mayor cantidad de casos son de v´ınculo **sin_relacion**, seguido por **relacion_no_familiar** y en menor medida, por **relacion_familiar**. Sin embargo, las tres categor´ıas presentan una cantidad de casos considerable.

## 5.2. Modelo explicativo

Los resultados se reflejan en la Tabla 8. La primera columna indica la variable que se está analizando y el intercepto, que refleja el modelo con todas las categorías de referencia mencionada en la sección 4.3.1. La segunda y la tercera columna representan los coeficientes $\beta_k$ obtenidos a partir del modelo logístico multinomial para cada variable y en cada categoría de vínculo. A la derecha del valor obtenido para cada coeficiente se aclara la significancia del mismo, de acuerdo a los códigos explicados al pie de la tabla. Las últimas tres columnas indican el promedio de los efectos marginales de la probabilidad en cada variable de cada una de las categorías.

| | **Estimación** | | **Efectos marginales en la probabilidad** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Variable** | **Relación Familiar** | **Relación No Familiar** | $p_1$ | $p_2$ | $p_3$ |
| (Intercept) | -1.0189 *** | -0.1020 | | | |
| poblacion | 0.0138 * | 0.0296 *** | -0.0000 | 0.0062 | -0.0062 |
| fin_de_semana | -0.1656 . | -0.1451 * | -0.0130 | -0.0242 | 0.0372 |
| hogar | 1.9727 *** | 0.3297 *** | 0.2434 | -0.0464 | -0.1970 |
| arma_blanca | -0.1167 | 0.2847 * | -0.0337 | 0.0757 | -0.0419 |
| arma_fuego | -1.0433 *** | -0.2570 * | -0.1235 | 0.0047 | 0.1187 |
| delito | -2.8440 *** | -2.1780 *** | -0.2426 | -0.3413 | 0.5840 |
| mujer | 2.0934 *** | 1.0461 *** | 0.2140 | 0.1177 | -0.3317 |
| edad | 0.0273 | 0.0399 . | 0.0011 | 0.0078 | -0.0089 |

**Nota**: Categoría de referencia: sin relacion. Significancia: $^{***}p < 0.001$, $^{**}p < 0.01$, $^{*}p < 0.05$, $^{\cdot}p < 0.1$
$p_1$: prob. de relación familiar, $p_2$: prob. de relación no familiar, $p_3$: prob. de sin relación.

Tabla 8: Modelo multinomial logístico.

En cuanto a la población, ambos coeficientes son significativos. De aquí en adelante, cada vez que se habla de los efectos marginales de la probabilidad en cada variable, se habla del promedio entre todas las observaciones para cierta variable y cierta categoría, por lo explicado en la sección 4.3.1. Por cada 100 000 habitantes, hay 0,06 % más de probabilidades de que sea causado por un conocido no familiar, y un 0,06 % menos de probabilidades de que sea causado por un desconocido. Por lo tanto, a mayor cantidad de habitantes en un centro urbano, menor probabilidad hay de que ocurran homicidios por parte de desconocidos. Los resultados son algo sorprendentes, porque sería lógico creer que en grandes ciudades es más frecuente el homicidio por parte de desconocidos. Sin embargo, analizando el gráfico de frecuencias de la variable *poblacion* con respecto a las categorías de vínculo (figura 1), se observa que la Ciudad de Buenos Aires (la de mayor población por diferencia) tiene un porcentaje menor de homicidios del tipo *sin_relacion* que de los otros dos tipos de vínculo. Esto no es del todo congruente con la tendencia general que se observa en la figura, donde el porcentaje de homicidios *sin_relacion* parece ir aumentando (o a lo sumo, mantenerse constante) a medida que aumenta la población. Sería prudente hacer un análisis similar, tratando a la Ciudad de Buenos Aires como un caso aislado. De todos modos el efecto es prácticamente nulo, por lo que no parece ser crítico su impacto en el modelo.

La variable *fin_de_semana* tiene coeficientes menos significativos que *poblacion*, con el coeficiente relacionado a *relacion_familiar* con un p-value entre 0,05 y 0,1. Si los consideramos, el modelo indica que los homicidios ocurridos durante el fin de semana tienen un 3,7 % más de probabilidades de ser causados por un desconocido. Las probabilidades de que la relación sea familiar o no familiar disminuyen en un 1,3 % y un 2,4 % respectivamente. Al ser variaciones poco considerables y los coeficientes poco significativos, no tiene demasiado sentido su interpretación.

Respecto al lugar del homicidio, los resultados son considerablemente más valiosos. Los coeficientes del modelo para la variable *hogar* son ambos muy significativos, con un p-value menor a 0,001. Los homicidios que ocurren en el hogar tienen un 24,3 % más de probabilidades de presentar un vínculo familiar. Esto es concordante con lo esperado: los homicidios familiares suelen ocurrir en el hogar. A su vez, disminuye mucho (19,7 %) las probabilidades de que el homicida sea desconocido, indicando que este tipo de homicidio suele ocurrir ya sea en la vía pública o en lugares como descampados, baldíos o similar. Los resultados además concuerdan con lo analizando en la figura 3.

El uso de arma blanca, por su parte, implica un aumento del 7,57 % de probabilidades de relación no familiar. El arma de fuego, en cambio, es un indicador bastante claro de homicidio por parte de un desconocido, con un 11,9 % de aumento en la probabilidad. Además el uso de arma de fuego se desasocia con un asesino familiar, con un 12,3 % menos de probabilidades.

Los resultados arrojados por la variable *delito* también son muy significativos y claros. El hecho de que el homicidio ocurra a la vez que un delito (ya sea robo, violación u otro), aumenta en un 58,4 % las probabilidades de que se trate de un desconocido. Es, por diferencia, la variable con mayor efecto marginal. Entre los efectos causados a las relaciones familiares y las no familiares, resulta menos probable que el homicida sea no familiar (34,1 %) que familiar (24,3 %) en el caso de delito. En general, los homicidios familiares y por conocidos nos familiares son por motivos diferentes que el robo. Es muy poco probable que un alguien asesine a un familiar para luego cometer un robo o violación. Sin embargo, como indica el gráfico de la variable *delito* (figura 5), existe una alta proporción de los homicidios sin delito que corresponden a desconocidos. Esto implica que no todos los desconocidos asesinan meramente para causar un robo o violación. Un delito en el homicidio implica casi siempre un desconocido, pero no viceversa.

En cuanto al género de la víctima, el hecho de que sea una mujer implica un significativo aumento del 21,4 % de probabilidades de que el homicida sea un familiar y un 11,8 % de que sea un conocido. Se demuestra que los homicidios a manos de desconocidos son un indicador de que la víctima probablemente fuera hombre y no mujer, con una baja del 33,2 % de las probabilidades en la categoría *sin_relacion*. En cambio, cuando existe algún vínculo entre víctima y victimaria, es más probable que se trate de una mujer. Los resultados también se condicen con lo comentado en el análisis exploratorio, donde se veía que cuando la víctima era mujer, era muchísimo más alto el porcentaje de homicidios a manos de familiares que de desconocidos.

Por último, la edad no presenta resultados demasiado valiosos para nuestro análisis. Los coeficientes no son significativos, e incluso si lo fueran, los efectos marginales en la probabilidad son menores al 1 % cada 10 años en los 3 casos.

## 5.3. Modelo predictivo

Los resultados de los modelos predictivos se basan en tres elementos. En primer lugar se detallan los indicadores obtenidos para cada combinación de hiperparámetros posibles. En segundo lugar se presenta la matriz de confusión del modelo final elegido. En tercer y último lugar se muestran los indicadores resultantes del modelo final, calculados a partir de lo explicado en la sección 4.4.2.

### *Light Gradient Boosting Machine*

Los indicadores de cada combinación de hiperparámetros fueron ordenados de mayor a menor. Se mantuvo el índice utilizado para identificar cada combinación de hiperparámetros posible, el cual fue definido en la sección 4.4.2. Se presentan los resultados de los 30 mejores modelos en la Tabla 9.

| # | max_prof | n_arb | eta | *AG* | $F_1$ | $\kappa$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 10 | 50 | 0.050 | 0.6643438 | 0.6566075 | 0.48330810 |
| 22 | 3 | 100 | 0.050 | 0.6562137 | 0.6535630 | 0.47775838 |
| 9 | 2 | 100 | 0.100 | 0.6573751 | 0.6535508 | 0.47597591 |
| 24 | 10 | 100 | 0.050 | 0.6620209 | 0.6530104 | 0.47872247 |
| 23 | 5 | 100 | 0.050 | 0.6608595 | 0.6526513 | 0.48045282 |
| 7 | 5 | 50 | 0.100 | 0.6596980 | 0.6519602 | 0.47785781 |
| 5 | 2 | 50 | 0.100 | 0.6527294 | 0.6516895 | 0.47263073 |
| 19 | 5 | 50 | 0.050 | 0.6550523 | 0.6502547 | 0.47445296 |
| 21 | 2 | 100 | 0.050 | 0.6504065 | 0.6490728 | 0.46884857 |
| 4 | 10 | 20 | 0.100 | 0.6550523 | 0.6471530 | 0.46900191 |
| 6 | 3 | 50 | 0.100 | 0.6492451 | 0.6467605 | 0.46697907 |
| 36 | 10 | 100 | 0.010 | 0.6550523 | 0.6416853 | 0.46697975 |
| 10 | 3 | 100 | 0.100 | 0.6457607 | 0.6416345 | 0.45756442 |
| 18 | 3 | 50 | 0.050 | 0.6399535 | 0.6408899 | 0.45599403 |
| 11 | 5 | 100 | 0.100 | 0.6492451 | 0.6406156 | 0.46136446 |
| 3 | 5 | 20 | 0.100 | 0.6434379 | 0.6398251 | 0.45688502 |
| 8 | 10 | 50 | 0.100 | 0.6492451 | 0.6392834 | 0.45901107 |
| 16 | 10 | 20 | 0.050 | 0.6480836 | 0.6332759 | 0.45568408 |
| 12 | 10 | 100 | 0.100 | 0.6434379 | 0.6328578 | 0.45138634 |
| 2 | 3 | 20 | 0.100 | 0.6318235 | 0.6320059 | 0.44503004 |
| 17 | 2 | 50 | 0.050 | 0.6248548 | 0.6287662 | 0.43151937 |
| 15 | 5 | 20 | 0.050 | 0.6387921 | 0.6226663 | 0.44539512 |
| 35 | 5 | 100 | 0.010 | 0.6376307 | 0.6213193 | 0.44347696 |
| 1 | 2 | 20 | 0.100 | 0.6167247 | 0.6195609 | 0.41989306 |
| 32 | 10 | 50 | 0.010 | 0.6236934 | 0.5977160 | 0.40658205 |
| 34 | 3 | 100 | 0.010 | 0.5981417 | 0.5976000 | 0.38790882 |
| 14 | 3 | 20 | 0.050 | 0.5981417 | 0.5974554 | 0.38761440 |
| 31 | 5 | 50 | 0.010 | 0.5934959 | 0.5499817 | 0.34626273 |
| 13 | 2 | 20 | 0.050 | 0.5412311 | 0.5259635 | 0.27666756 |
| 33 | 2 | 100 | 0.010 | 0.5412311 | 0.5259635 | 0.27666756 |

Tabla 9: Indicadores para cada combinación posible de hiperparámetros.

La combinación de hiperparámetros con mejores resultados fue la número 20, que incluye una *máxima profundidad* de 10, una *cantidad de árboles* de 50 y una *tasa de aprendizaje* de 0,050. Los modelos siguientes obtienen indicadores relativamente similares a los del primero pero luego van empeorando significativamente. Los hiperparámetros de la combinación 20 fueron utilizados para realizar el modelo final de *LGBM* y sus predicciones fueron:

| | | Clase real | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **relacion_familiar** | **relacion_no_familiar** | **sin_relacion** |
| Clase predicha | **relacion_familiar** | 151 | 58 | 25 |
| | **relacion_no_familiar** | 51 | 149 | 73 |
| | **sin_relacion** | 16 | 71 | 265 |

Tabla 10: Matriz de confusión para el modelo *LGBM*.

A partir de los resultados expuestos en la Tabla 10 se calcularon los indicadores de ajuste correspondientes.

$$AG = 0,6577416$$
$$F_1 = 0,6500784$$
$$\kappa = 0,4773458$$

### *eXteme Gradient Boosting*

Los resultados de este algoritmo fueron tratados de igual manera que los anteriores.

| # | max_prof | n_arb | eta | $AG$ | $F_1$ | $\kappa$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 5 | 50 | 0.100 | 0.6666667 | 0.6614719 | 0.4919038 |
| 9 | 2 | 100 | 0.100 | 0.6620209 | 0.6598266 | 0.4854698 |
| 23 | 5 | 100 | 0.050 | 0.6573751 | 0.6526782 | 0.4778053 |
| 10 | 3 | 100 | 0.100 | 0.6550523 | 0.6524804 | 0.4734335 |
| 6 | 3 | 50 | 0.100 | 0.6515679 | 0.6506859 | 0.4707954 |
| 22 | 3 | 100 | 0.050 | 0.6480836 | 0.6479029 | 0.4653160 |
| 11 | 5 | 100 | 0.100 | 0.6492451 | 0.6445230 | 0.4638700 |
| 3 | 5 | 20 | 0.100 | 0.6411150 | 0.6404805 | 0.4546209 |
| 19 | 5 | 50 | 0.050 | 0.6399535 | 0.6384654 | 0.4525428 |
| 8 | 10 | 50 | 0.100 | 0.6434379 | 0.6325228 | 0.4504625 |
| 24 | 10 | 100 | 0.050 | 0.6399535 | 0.6300650 | 0.4450336 |
| 15 | 5 | 20 | 0.050 | 0.6271777 | 0.6292263 | 0.4354133 |
| 21 | 2 | 100 | 0.050 | 0.6248548 | 0.6273817 | 0.4319548 |
| 5 | 2 | 50 | 0.100 | 0.6236934 | 0.6263940 | 0.4308030 |
| 35 | 5 | 100 | 0.010 | 0.6236934 | 0.6257630 | 0.4298048 |
| 18 | 3 | 50 | 0.050 | 0.6236934 | 0.6255709 | 0.4334284 |
| 12 | 10 | 100 | 0.100 | 0.6364692 | 0.6254570 | 0.4410714 |
| 39 | 5 | 20 | 0.001 | 0.6248548 | 0.6250896 | 0.4305695 |
| 4 | 10 | 20 | 0.100 | 0.6329849 | 0.6236720 | 0.4358547 |
| 43 | 5 | 50 | 0.001 | 0.6236934 | 0.6235047 | 0.4287399 |
| 47 | 5 | 100 | 0.001 | 0.6236934 | 0.6235047 | 0.4287399 |
| 16 | 10 | 20 | 0.050 | 0.6306620 | 0.6222204 | 0.4324748 |
| 20 | 10 | 50 | 0.050 | 0.6318235 | 0.6205802 | 0.4320982 |
| 2 | 3 | 20 | 0.100 | 0.6190476 | 0.6205589 | 0.4280541 |
| 31 | 5 | 50 | 0.010 | 0.6190476 | 0.6202220 | 0.4221701 |
| 36 | 10 | 100 | 0.010 | 0.6271777 | 0.6175524 | 0.4257460 |
| 48 | 10 | 100 | 0.001 | 0.6248548 | 0.6162717 | 0.4215335 |
| 17 | 2 | 50 | 0.050 | 0.6132404 | 0.6145068 | 0.4213710 |
| 32 | 10 | 50 | 0.010 | 0.6213705 | 0.6126553 | 0.4169974 |
| 28 | 10 | 20 | 0.010 | 0.6213705 | 0.6116078 | 0.4163027 |

Tabla 11: Indicadores para cada combinación posible de hiperparámetros.

En esta oportunidad, la combinación de hiperparámetros con mejores resultados fue la número 7, que incluye una *máxima profundidad* de 5, una *cantidad de árboles* de 50 y una *tasa de aprendizaje* de 0,100. Los modelos siguientes obtienen indicadores relativamente similares a los del primero y al contrario que el algoritmo anterior, los resultados no empeoran drásticamente.

Los hiperparámetros de la combinación 7 fueron utilizados para realizar el modelo final de *XGBoost* y sus predicciones fueron:

| | | Clase real | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **relacion_familiar** | **relacion_no_familiar** | **sin_relacion** |
| Clase predicha | **relacion_familiar** | 162 | 59 | 29 |
| | **relacion_no_familiar** | 42 | 151 | 89 |
| | **sin_relacion** | 14 | 68 | 245 |

Tabla 12: Matriz de confusión para el modelo XGBoost.

A partir de los resultados expuestos en la Tabla 12 se calcularon los indicadores de ajuste correspondientes.

$$AG = 0,6495925$$
$$F_1 = 0,6472461$$
$$\kappa = 0,4682963$$

**Elección del modelo predictivo final**

Habiendo elegido los dos mejores modelos predicitvos, uno para cada algoritmo de *Gradient Boosting*, se puede avanzar en la elección del modelo predictivo que mejor se ajuste a la realidad de los homicidios dolosos en Argentina. Aunque ambos modelos obtengan prácticamente los mismos indicadores de ajuste, los del modelo *LGBM* con la combinación #20 de hiperparámetros son levemente mayores a los del modelo *XGBoost* con la combinación #7 de hiperparámetros. Se podr´ıan utilizar cualquiera de los dos algoritmos propuestos si se seleccionan correctamente los hiperparámetros, ya que ambos demostraron que pueden obtener resultados relativamente semejantes. Sin embargo, en esta oportunidad, se selecciona como modelo predictivo final al algoritmo de ***Light Gradient Boosting Machine* con una *máxima profundidad* de 10, una *cantidad de árboles* de 50 y una *tasa de aprendizaje* de 0,050.** Estos hiperparámetros denotan que el modelo posee una cantidad moderada de árboles (el intermedio entre los tres posibles: 20, 50 y 100) con una profundidad elevada (la mayor entre las 4 posibles: 2, 3, 5 y 10). A su vez, la tasa de aprendizaje seleccionada es de un rango medio. Se puede deducir de esta combinación de hiperparámetros, que el modelo aprende con fuerza desde cada árbol.

Los indicadores de ajuste del modelo predictivo final obtienen resultados aceptables pero con espacio a mejora. En primer lugar, el acierto general alcanzó un valor de 65, 8 %, lo que indica que el modelo puede predecir correctamente el 65, 8 % de los casos. Aunque idealmente se esperar´ıa obtener un acierto general del 100 %, para un primer estudio y con los datos disponibles al momento, acertar en dos tercios de los casos parecer´ıa representar una gran ayuda como primer indicio en un proceso de investigación penal.

Por otro lado, el $F_1$-score obtuvo un valor de 65 %, la cual coincide con el acierto general. Esto sugiere que la predicciones correctas representadas por el acierto general no están dominadas por una sola clase sino que se reparten equilibradamente entre los tres factores de la variable respuesta. A su vez, se puede interpretar que la precisión y la sensibilidad de cada categor´ıa no tienen grandes discrepancias, lo que implica que los aciertos en las predicciones de una clase son similares a los aciertos en los casos reales de la misma clase. Estas interpretaciones se logran visualizar en la matriz de confusión del modelo, estructurada en la Tabla 10. Los casos en los

que el modelo predijo erróneamente que el vínculo era **relacion_familiar**, cuando en realidad el vínculo era **relacion_no_familiar**, fueron 58; un valor muy cercano a los 51 casos en los que el modelo predijo erróneamente que el vínculo era **relacion_no_familiar**, cuando en realidad el vínculo era **relacion_familiar**. Lo mismo sucede para **sin_relacion** y **relacion_no_familiar** donde 25 y 16 casos fueron clasificados de manera equívoca una clase con la otra. En el tercer cruce, **relacion_no_familiar** con **sin_relacion**, la cantidad de casos son aún más semejantes, alcanzando valores de 71 y 73 predicciones incorrectas. En consecuencia, se puede suponer que el rendimiento del modelo no está sesgado por ninguna de las tres clases de la variable respuesta, lo que representa equilibrio y consistencia en el modelo planteado.

En último lugar, el índice Kappa de Cohen obtuvo un 47, 7 % para el modelo predictivo final. La fuerza de concordancia según este indicador se puede clasificar como lo hicieron Landis y Koch (1977):

| **Estadístico *kappa*** | **Concordancia** |
|---|---|
| <0.00 | Pobre |
| 0.00 - 0.20 | Ligera |
| 0.21 - 0.40 | Aceptable |
| 0.41 - 0.60 | Moderada |
| 0.61 - 0.80 | Substancial |
| 0.81 - 1.00 | Casi Perfecta |

Tabla 13: Fuerza de concordancia según *kappa*

El valor obtenido entraría en el rango entre 0.41 y 0.60, lo cual denota una fuerza de concordancia moderada. El índice elimina el efecto del azar, por lo cual es más "exigente" obtener valor elevados. Teniendo esto en cuenta, y que el resultado es más que aceptable, se puede considerar que el modelo ha aprendido patrones relevantes a partir de la base de datos provista y que es capaz de predecir significativamente a partir de estos patrones y no aleatoriamente.

# 6. Conclusiones

Los objetivos de este trabajo eran describir y demostrar las tendencias de los homicidios dolosos en Argentina y desarrollar un modelo capaz de predecir el vínculo entre la víctima y el homicida (familiar, conocido o desconocido).

En relación al primer objetivo, los homicidios en Argentina presentan ciertos patrones fácilmente reconocibles. La mayor cantidad de los casos son ocasionados por personas sin relación con la víctima (40 %). Estos incidentes se caracterizan por ocurrir en conjunto con otro delito (robo, violación u otro) y suelen ser causados por el uso de un arma de fuego. A su vez, las víctimas de estos homicidios son en su mayoría de genero masculino, probablemente por estar más expuestos a situaciones de riesgo fuera del hogar. Por el contrario, los homicidios entre familiares (26, 5 %) representan la categoría con menor cantidad de casos. Los mismos suelen ocurrir, lógicamente, en los hogares y en ausencia de cualquier otro delito. En estos casos, no se suelen utilizar armas de fuego para acabar con la vida de las víctimas, las cuales suelen ser mujeres. En último lugar y con un 33, 5 % de los casos, se encuentran los homicidios ocasionados por un conocido fuera de la familia. Este tipo de asesinato es similar al ocurrido entre familiares, pero en estos casos en particular, no hay una relación tan estrecha con que el hecho ocurra dentro del hogar. Además, es la categoría con menor presencia de otro delito al momento del homicidio. De manera similar que los homicidios familiares, las mujeres son más propensas que los hombres a ser asesinadas por una persona conocida. Cabe destacar que los análisis realizados en el modelo exploratorio son validados por los resultados del modelo explicativo, lo que hace más robusto al estudio y su capacidad de explicar la realidad.

Por otro lado, con respecto al segundo objetivo, el modelo predictivo seleccionado obtuvo un acierto general de 65, 8 %, un $F_1$-score de 65 % y un índice Kappa de 47, 7 %. Los resultados alcanzados se pueden considerar moderadamente buenos, lo que representa un ajuste aceptable del modelo con la realidad. Se pudo comprobar que el mismo no se comporta aleatoriamente y está balanceado respecto a las tres categorías de la variable respuesta. En consecuencia, se interpreta que el modelo aprende correctamente los patrones aportados por la base de datos provista y que es capaz de predecir en función a estos.

En conclusión, los objetivos planteados fueron cumplidos satisfactoriamente. El análisis exploratorio y explicativo es capaz de detectar y describir tendencias que permiten entender mejor la situación homicida en el país. Los resultados del modelo explicativo son significativos y congruentes a la realidad. El desarrollo el modelo predictivo demostró obtener resultados positivos. Los indicadores del mismo revelan que sería capaz de dar una buena primera aproximación o primeros indicios en una investigación penal. Sin embargo, con el fin de mejorar los índices de este modelo se podría considerar: ampliar la base de datos incluyendo más años, procurar no tener datos faltantes y/o incluir más variables explicativas como la calidad de vida, entre otros. A su vez, sería interesante replicar este estudio para otros países y comparar los resultados obtenidos. Más allá de los objetivo cumplidos, este trabajo demuestra que a partir del uso de la tecnología se puede ir en búsqueda de un sistema penal y judicial más trasparente y eficiente.

# 7. Bibliografía


Agresti, A. (2007). An introduction to categorical data analysis (2nd ed.). Wiley-Interscience.

Ajzenman, N., y Jaitman, L. (2016). Crime Concentration and Hot Spot Dynamics in Latin America.

Alan B. Cantor (1995). Sample-Size Calculations for Cohen's Kappa. American Psychological Association.

Anny Kim, Julien Chopin & Eric Beauregard (2024). Tell Me What You Do, I'll Tell You Who You Are: Predicting Offender-Victim Relationships in Sexual Homicide. Victims & Offenders.

Bergman, M., Ambrogi, J., Bruno, M., Croci, G., Prueger, E. A. (2023). Estudio sobre homicidios en Argentina: un análisis del periodo 2001–2021. Universidad de Tres de Febrero.

Buuren, S., Groothuis-Oudshoorn, C. (2011). MICE: Multivariate Imputation by Chained Equations in R. Journal of Statistical Software.

Cao, L., Hou, C., Huang, B. (2008). Correlates of the victim-offender relationship in homicide. International Journal of Offender Therapy and Comparative Criminology, 52(6), 658–672.

Decker, S. H. (1993). Exploring victim-offender relationships in homicide: The role of individual and event characteristics. Justice Quarterly, 10(4), 585–612.

Drawdy, S. M., Myers, W. C. (2004). Homicide victim/offender relationship in Florida Medical Examiner District 8. Journal of Forensic Sciences, 49(1), 150–154.

Florek, P., & Zagdański, A. (2023). Benchmarking state-of-the-art gradient boosting algorithms for classification.

Haddouchi, M., & Berrado, A. (2024). A survey and taxonomy of methods interpreting random forest models.

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). Springer.

Heymann, P. B. (1985). Understanding Criminal Investigations. Harvard Journal on Legislation, 22, 315.

INDEC. (2023). Total del pa´ıs. Viviendas particulares y población en viviendas particulares, según área de gobierno local. Buenos Aires, Argentina.

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. Biometrics, 33(1), 159.

López de Ullibarri Galparsoro, I., Pita Fernández, S. (2001). Medidas de concordancia: el ´ındice de Kappa. Unidad de Epidemiolog´ıa Cl´ınica y Bioestad´ıstica, Complexo Hospitalario-Universitario Juan Canalejo, A Coruña (España).

Manjarrés, J., Newton, C., & Cavalari, M. (2025, May 16). Balance de InSight Crime de los homicidios en 2024. InSight Crime. https://insightcrime.org/es/noticias/balance-insight-crime-homicidios-2024/

Ministerio de Seguridad de la Nación. Dirección Nacional de Estad´ıstica Criminal. (2024, 19 de diciembre). Homicidios dolosos. Sistema de Alerta Temprana. Estad´ısticas criminales en la República Argentina. [Conjunto de datos]. Recuperado el 28 de mayo de 2025, de https://www.argentina.gob.ar/seguridad/estadisticascriminales

Nagin, D. (1998). Criminal Deterrence Research at the Outset of the Twenty-First Century. In M. Tonry (Ed.), Crime and Justice: A Review of Research (Vol. 23). University of Chicago Press.

Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. (2023). Estudio Mundial sobre el Homicidio 2023. https://dataunodc.un.org/content/country-list

Paternoster, R. (2010). How Much Do We Really Know about Criminal Deterrence? Journal of Criminal Law and Criminology, 100(3), 765–823.

Ramos, L. A., Olmedo, M. C., & Ditz, Y. A. (2022). Modelos criminológicos aplicados a la criminalidad de robos, estupefacientes y homicidios ocurridos en la Ciudad de Córdoba. In III Congreso Internacional de Victimología (Ensenada, October 28–30, 2021).

Riedel, M. (1988). Stranger Violence: Perspectives, Issues, and Problems. Journal of Criminal Law & Criminology, 78, 223.

Rigano, C. (2019). "Using Artificial Intelligence to Address Criminal Justice Needs."NIJ Journal, 280, January.

Van Buuren, S. (2018). Flexible Imputation of Missing Data (2nd ed.). Chapman and Hall/CRC.

Wolfgang, M. (1958). Patterns in Criminal Homicide. University of Pennsylvania Press.

Zhang, R. (2021, November 23). Guide to the gradient boosting algorithm. DataCamp. https://www.datacamp.com/tutorial/guide-to-the-gradient-boosting-algorithm

# 8. Apéndice

## Código de R utilizado para el análisis exploratorio

```
install.packages("ggplot2")
install.packages("readr")
install.packages("dplyr")
library(ggplot2)
library(readr)
library(dplyr)

#POBLACION
ggplot(data = datos, aes(x = poblacion, fill = relacion_inculpado)) +
  geom_histogram(binwidth = 100000, color = "black") +
  scale_fill_manual(values = c(
    "relacion_familiar" = "lightpink",
    "relacion_no_familiar" = "powderblue",
    "sin_relacion" = "honeydew"
  )) +
  theme_minimal() +
  theme(legend.position = "right",
        axis.title.x = element_text(margin = margin(t = 20)),
        axis.title.y = element_text(margin = margin(r = 20))
  ) +
  labs(x = "poblacion", y = "cantidad de casos", fill = NULL) +
  scale_x_continuous(
    breaks = seq(0, 10000000, by = 500000),
    labels = scales::comma
  )


#DIA_SEM
datos$dia_sem <- factor(datos$dia_sem, levels = as.character(1:7))
ggplot(data = datos, aes(x = dia_sem, fill = relacion_inculpado)) +
  geom_bar(color = "black") +
  scale_fill_manual(values = c(
    "relacion_familiar" = "lightpink",
    "relacion_no_familiar" = "powderblue",
    "sin_relacion" = "honeydew"
  )) +
  theme_minimal() +
  theme(legend.position = "right",
        axis.title.x = element_text(margin = margin(t = 20)),
        axis.title.y = element_text(margin = margin(r = 20))
  ) +
  labs(x = "dia_sem", y = "cantidad de casos", fill = NULL)


#LUGAR
datos <- datos %>%
  mutate(lugar = if_else(is.na(lugar), "desconocido", lugar)) %>%
  mutate(lugar_filtrado = if_else(
    lugar %in% c("hogar", "via_publica"),
    lugar,
    if_else(lugar == "desconocido", "desconocido", "otro")
  ))
datos$lugar_filtrado <- factor(datos$lugar_filtrado,
levels = c("hogar", "via_publica", "otro","desconocido"))
ggplot(datos, aes(x = lugar_filtrado, fill = relacion_inculpado)) +
  geom_bar(color = "black") +
  scale_fill_manual(values = c(
    "relacion_familiar" = "lightpink",
    "relacion_no_familiar" = "powderblue",
```

```
    "sin_relacion" = "honeydew"
  )) +
  theme_minimal() +
  theme(legend.position = "right",
        axis.title.x = element_text(margin = margin(t = 20)),
        axis.title.y = element_text(margin = margin(r = 20))
  ) +
  labs(x = "lugar", y = "cantidad de casos", fill = NULL)



#ARMA
datos <- datos %>%
  mutate(arma = if_else(is.na(arma), "desconocido", arma)) %>%
  mutate(arma_filtrado = if_else(
    arma %in% c("fuego", "blanca", "objeto_contundente",
    "golpes", "ahorcamiento", "quemadura"),
    arma,
    if_else(arma == "desconocido", "desconocido", "otro")
  )) %>%
  mutate(arma_filtrado = factor(
    arma_filtrado,
    levels = c("fuego", "blanca", "objeto_contundente",
    "golpes", "ahorcamiento", "quemadura", "otro", "desconocido")
  ))

ggplot(datos, aes(x = arma_filtrado, fill = relacion_inculpado)) +
  geom_bar(color = "black") +
  scale_fill_manual(values = c(
    "relacion_familiar" = "lightpink",
    "relacion_no_familiar" = "powderblue",
    "sin_relacion" = "honeydew"
  )) +
  theme_minimal() +
  theme(legend.position = "right",
        axis.title.x = element_text(margin = margin(t = 20)),
        axis.title.y = element_text(margin = margin(r = 20))
  ) +
  labs(x = "arma", y = "cantidad de casos", fill = NULL)


#DELITO
datos <- datos %>%
  mutate(delito = if_else(is.na(delito), "desconocido", delito)) %>%
  mutate(delito = factor(delito, levels = c("no", "robo",
  "otro", "violacion", "desconocido")))
ggplot(data = datos, aes(x = delito, fill = relacion_inculpado)) +
  geom_bar(color = "black") +
  scale_fill_manual(values = c(
    "relacion_familiar" = "lightpink",
    "relacion_no_familiar" = "powderblue",
    "sin_relacion" = "honeydew"
  )) +
  theme_minimal() +
  theme(legend.position = "right",
        axis.title.x = element_text(margin = margin(t = 20)),
        axis.title.y = element_text(margin = margin(r = 20))
  ) +
  labs(x = "delito", y = "cantidad de casos", fill = NULL)


#GENERO
datos <- datos %>%
```

```
  mutate(genero = if_else(is.na(genero), "desconocido", genero)) %>%
  mutate(genero = factor(genero,
  levels = c("varon", "mujer", "trans", "desconocido")))
ggplot(data = datos, aes(x = genero, fill = relacion_inculpado)) +
  geom_bar(color = "black") +
  scale_fill_manual(values = c(
    "relacion_familiar" = "lightpink",
    "relacion_no_familiar" = "powderblue",
    "sin_relacion" = "honeydew"
  )) +
  theme_minimal() +
  theme(legend.position = "right",
        axis.title.x = element_text(margin = margin(t = 20)),
        axis.title.y = element_text(margin = margin(r = 20))
  ) +
  labs(x = "genero", y = "cantidad de casos", fill = NULL)


#EDAD
ggplot(data = datos, aes(x = factor(edad), fill = relacion_inculpado)) +
  geom_bar(color = "black") +
  scale_fill_manual(values = c(
    "relacion_familiar" = "lightpink",
    "relacion_no_familiar" = "powderblue",
    "sin_relacion" = "honeydew"
  )) +
  theme_minimal() +
  theme(legend.position = "right",
        axis.title.x = element_text(margin = margin(t = 20)),
        axis.title.y = element_text(margin = margin(r = 20))
  ) +
  labs(x = "edad", y = "cantidad de casos", fill = NULL)


#RELACION_INCULPADO
datos$relacion_inculpado <- factor(datos$relacion_inculpado,
levels = c("sin_relacion", "relacion_no_familiar", "relacion_familiar"))
ggplot(data = datos, aes(x = relacion_inculpado, fill = relacion_inculpado)) +
  geom_bar(color = "black") +
  scale_fill_manual(values = c(
    "relacion_familiar" = "lightpink",
    "relacion_no_familiar" = "powderblue",
    "sin_relacion" = "honeydew"
  )) +
  geom_text(stat = "count", aes(label = ..count..), vjust = -0.3, size = 3) +
  theme_minimal() +
  theme(legend.position = "right",
        axis.title.x = element_text(margin = margin(t = 20)),
        axis.title.y = element_text(margin = margin(r = 20))
  ) +
  labs(x = "relacion_inculpado", y = "cantidad de casos", fill = NULL)
```

## Código de R utilizado para el modelado explicativo

```
library(mlogit)
library(caret)
library(foreign)

set.seed(0)

# Keep selected columns
cols <- c("poblacion", "fin_de_semana", "hogar", "arma", "delito","mujer", "edad",
  "relacion_inculpado")
data <- data[, cols]
data$fin\_de\_semana <- as.factor(data$fin_de_semana)
data$hogar <- as.factor(data$hogar)
data$arma <- as.factor(data$arma)
data$delito <- as.factor(data$delito)
data$mujer <- as.factor(data$mujer)
data$relacion_inculpado <- as.factor(data$relacion_inculpado)


# Relevel categorical variables
data$fin_de_semana <- relevel(data$fin_de_semana, ref = "0")
data$hogar   <- relevel(data$hogar, ref = "0")
data$arma    <- relevel(data$arma, ref = "sin_arma")
data$delito  <- relevel(data$delito, ref = "0")
data$mujer  <- relevel(data$mujer, ref = "0")
data$relacion_inculpado <- relevel(data$relacion_inculpado, ref = "sin_relacion")

# === Mlogit ===
data = mlogit.data(data,shape="wide",choice="relacion_inculpado")
model <- mlogit(relacion_inculpado ~ 0 | poblacion + fin\_de\_semana + hogar + arma
  + delito + mujer + edad , data = data,  reflevel = "sin_relacion")
summary(model)
```

## Código de R utilizado para el modelado predictivo

### Light Gradient Boosting Machine

```
# Install required packages if not already installed
if (!requireNamespace("lightgbm", quietly = TRUE)) install.packages("lightgbm",
repos = "https://cran.r-project.org")
if (!requireNamespace("foreign", quietly = TRUE)) install.packages("foreign")
if (!requireNamespace("caret", quietly = TRUE)) install.packages("caret")
if (!requireNamespace("data.table", quietly = TRUE)) install.packages("data.table")
if (!requireNamespace("stringi", quietly = TRUE)) install.packages("stringi")
if (!requireNamespace("dplyr", quietly = TRUE)) install.packages("dplyr")
if (!requireNamespace("MLmetrics", quietly = TRUE)) install.packages("MLmetrics")

library(MLmetrics)
library(dplyr)
library(lightgbm)
library(foreign)
library(caret)
library(data.table)
library(psych)

# Keep selected columns
cols <- c("poblacion", "mes", "dia", "dia_sem", "lugar", "arma", "delito",
"registro", "genero", "edad", "clase", "relacion_inculpado")
data <- data[, cols]
data$lugar <- as.factor(data$lugar)
data$arma <- as.factor(data$arma)
data$delito <- as.factor(data$delito)
data$registro <- as.factor(data$registro)
data$genero <- as.factor(data$genero)
data$clase <- as.factor(data$clase)
data$relacion_inculpado <- as.factor(data$relacion_inculpado)

# Inspect target
table(data$relacion_inculpado)

# Encode categorical variables with dummy variables
dummies <- model.matrix(~ lugar + arma + delito + registro + genero + clase,
data = data)[, -1]
features <- cbind(dummies, data[, c("poblacion", "mes", "dia", "dia_sem", "edad")])
target <- as.numeric(data$relacion_inculpado) - 1

# Train/Val/test split: 70%, 15%, 15%
set.seed(0)
train_index <- createDataPartition(target, p = 0.7, list = FALSE)
val_index <- createDataPartition(target[-train_index], p = 0.5, list = FALSE)
X_train <- features[train_index, ]
X_test <- features[-train_index, ][-val_index, ]
X_val <- features[-train_index, ][val_index, ]
y_train <- target[train_index]
y_test <- target[-train_index][-val_index]
y_val <- target[-train_index][val_index]

# Create lgb.Dataset
lgb_train <- lgb.Dataset(data = as.matrix(X_train), label = y_train)

# === LGBM Grid-Search ==== #

# Define grid search parameters
grid <- expand.grid(
  max_depth = c(2,3, 5, 10),
  num_iterations = c(20,50, 100),
```

```
  learning_rate = c(0.1, 0.05, 0.01, 0.001)
)


# Run Grid-Search
results <- data.frame()

for (i in 1:nrow(grid)) {
  params <- list(
    objective = "multiclass",
    num_class = length(unique(target)),
    metric = "multi_logloss",
    max_depth = grid$max_depth[i],
    num_iterations = grid$num_iterations[i],
    learning_rate = grid$learning_rate[i],
    verbosity = -1,
    seed=0,
    is_unbalance = TRUE #si el dataset esta desbalanceado
  )

  model <- lgb.train(params = params, data = lgb_train, verbose = -1)

  # Predict
  preds <- predict(model, as.matrix(X_val))
  pred_labels <- apply(matrix(preds, ncol = length(unique(target))),
  1, which.max) - 1

  # Indicators
  acc <- mean(pred_labels == y_val)
  f1a <- F1_Score(y_pred = pred_labels, y_true = y_val, positive = 0)
  f1b <- F1_Score(y_pred = pred_labels, y_true = y_val, positive = 1)
  f1c <- F1_Score(y_pred = pred_labels, y_true = y_val, positive = 2)
  f1 <- (f1a + f1b + f1c)/3
  kappa <- cohen.kappa(x = cbind(pred_labels, y_val))$kappa

  results <- rbind(results, data.frame(
    max_depth = params$max_depth,
    num_iterations = params$num_iterations,
    learning_rate = params$learning_rate,
    accuracy = acc,
    f1 = f1,
    kappa = kappa
  ))
}

# Print results
print(results[order(-results$f1), ])

# === LGBM Final Model ==== #

# Get final train dataset: train + val
X_train_val <- bind_rows(X_train, X_val)
y_train_val <- c(y_train, y_val)
lgb_train_val <- lgb.Dataset(data = as.matrix(X_train_val), label = y_train_val)

# Set params (best)
best_params <- list(
  objective = "multiclass",
  num_class = length(unique(target)),
  metric = "multi_logloss",
  max_depth = 10,
  num_iterations = 50,
  learning_rate = 0.05,
```

```
  verbosity = -1,
  seed=0,
  is_unbalance = TRUE

)

# Train LGBM
model <- lgb.train(params = best_params, data = lgb_train_val, verbose = -1)

# Predict
preds <- predict(model, as.matrix(X_test))
pred_labels <- apply(matrix(preds, ncol = length(unique(target))), 1, which.max) - 1

# Indicators
acc <- mean(pred_labels == y_test)
f1a <- F1_Score(y_pred = pred_labels, y_true = y_test, positive = 0)
f1b <- F1_Score(y_pred = pred_labels, y_true = y_test, positive = 1)
f1c <- F1_Score(y_pred = pred_labels, y_true = y_test, positive = 2)
f1 <- (f1a + f1b + f1c)/3
kappa <- cohen.kappa(x = cbind(pred_labels, y_test))$kappa
print(acc)
print(f1)
print(kappa)

# Confussion Matrix
table(Predicted = pred_labels, Actual = y_test)
```

### eXtreme Gradient Boosting

```
# Install required packages if not already installed
if (!requireNamespace("xgboost", quietly = TRUE)) install.packages("lightgbm",
repos = "https://cran.r-project.org")
if (!requireNamespace("foreign", quietly = TRUE)) install.packages("foreign")
if (!requireNamespace("caret", quietly = TRUE)) install.packages("caret")
if (!requireNamespace("data.table", quietly = TRUE)) install.packages("data.table")
if (!requireNamespace("stringi", quietly = TRUE)) install.packages("stringi")
if (!requireNamespace("dplyr", quietly = TRUE)) install.packages("dplyr")
if (!requireNamespace("MLmetrics", quietly = TRUE)) install.packages("MLmetrics")

library(MLmetrics)
library(dplyr)
library(xgboost)
library(foreign)
library(caret)
library(data.table)
library(psych)

set.seed(0)

# Keep selected columns
cols <- c("poblacion", "mes", "dia", "dia_sem", "lugar", "arma",
"delito", "registro", "genero", "edad", "clase", "relacion_inculpado")
data <- data[, cols]
data$lugar <- as.factor(data$lugar)
data$arma <- as.factor(data$arma)
data$delito <- as.factor(data$delito)
data$registro <- as.factor(data$registro)
data$genero <- as.factor(data$genero)
data$clase <- as.factor(data$clase)
data$relacion_inculpado <- as.factor(data$relacion_inculpado)

# Inspect target
table(data$relacion_inculpado)

# Encode categorical variables with dummy variables
dummies <- model.matrix(~ lugar + arma + delito + registro + genero + clase,
data = data)[, -1]
features <- cbind(dummies, data[, c("poblacion", "mes", "dia", "dia_sem", "edad")])
target <- as.numeric(data$relacion_inculpado) - 1

# Train/Val/test split: 70%, 15%, 15%
train_index <- createDataPartition(target, p = 0.7, list = FALSE)
val_index <- createDataPartition(target[-train_index], p = 0.5, list = FALSE)
X_train <- features[train_index, ]
X_test <- features[-train_index, ][-val_index, ]
X_val <- features[-train_index, ][val_index, ]
y_train <- target[train_index]
y_test <- target[-train_index][-val_index]
y_val <- target[-train_index][val_index]

# Create XGBoost matrix
dtrain <- xgb.DMatrix(data = as.matrix(X_train), label = y_train)


# === XGBoost Grid-Search ==== #

# Define grid search parameters
grid <- expand.grid(
  max_depth = c(2,3, 5, 10),
  nrounds = c(20,50, 100),
```

```
  eta = c(0.1, 0.05, 0.01, 0.001)
)

# Run Grid-Search
results <- data.frame()

for (i in 1:nrow(grid)) {
  params <- list(
    objective = "multi:softmax",  # Multi-class classification
    num_class = length(unique(target)),
    max_depth = grid$max_depth[i],
    eta = grid$eta[i],
    eval_metric = "mlogloss",
    seed = 0
  )

  model <- xgb.train(params = params, data = dtrain, verbose = 0,
  nrounds = grid$nrounds[i])

  # Predict
  preds <- predict(model, as.matrix(X_val))

  # Indicators
  pred_labels <- preds
  acc <- mean(pred_labels == y_val)
  f1a <- F1_Score(y_pred = pred_labels, y_true = y_val, positive = 0)
  f1b <- F1_Score(y_pred = pred_labels, y_true = y_val, positive = 1)
  f1c <- F1_Score(y_pred = pred_labels, y_true = y_val, positive = 2)
  f1 <- (f1a + f1b + f1c)/3
  kappa <- cohen.kappa(x = cbind(pred_labels, y_val))$kappa

  results <- rbind(results, data.frame(
    max_depth = params$max_depth,
    nrounds = grid$nrounds[i],
    eta = params$eta,
    accuracy = acc,
    f1 = f1,
    kappa = kappa
  ))
}

# Print results
print(results[order(-results$f1), ])

# === XGBoost Final Model ==== #

# Get final train dataset: train + val
X_train_val <- bind_rows(X_train, X_val)
y_train_val <- c(y_train, y_val)

dtrain_val <- xgb.DMatrix(data = as.matrix(X_train_val), label = y_train_val)

# Set params (best from grid search)
best_params <- list(
  objective = "multi:softmax",  # Multi-class classification
  num_class = length(unique(target)),
  max_depth = 5,
  eta = 0.1,
  eval_metric = "mlogloss",
  seed = 0
)
```

```
# Train XGBoost
model <- xgb.train(params = best_params, data = dtrain_val, verbose = 0,
nrounds = 50)

# Predict
preds <- predict(model, as.matrix(X_test))
pred_labels <- preds

# Indicators
acc <- mean(pred_labels == y_test)
f1a <- F1_Score(y_pred = pred_labels, y_true = y_test, positive = 0)
f1b <- F1_Score(y_pred = pred_labels, y_true = y_test, positive = 1)
f1c <- F1_Score(y_pred = pred_labels, y_true = y_test, positive = 2)
f1 <- (f1a + f1b + f1c)/3
kappa <- cohen.kappa(x = cbind(pred_labels, y_test))$kappa
print(acc)
print(f1)
print(kappa)

# Confusion Matrix
table(Predicted = pred_labels, Actual = y_test)
```


UCA
UCA