

Editorial

Artículos de investigación

- Modelo dinámico para el pronóstico de la demanda en empresa de alimentos** 7-24
Dynamic model for demand forecasting in a food company
Normeviz Depablo Vizcaya, Paola Martínez Valero, Francisco Figueredo Lugo
- Evaluación de la eficiencia de equipos profesionales de fútbol mediante la combinación de AHP y DEA** 25-50
Evaluation of the efficiency of professional football teams through the combination of AHP and DEA
Pedro Teppa-Garran, Ezequiel Fernández
- Reducción de pérdidas en tratamiento de degradaciones de tubos de acero mediante la aplicación del Kobetsu-Kaizen** 51-70
Reduction of losses in treatment of steel tube degradation through application of the Kobetsu-Kaizen
Kimberly Colls Romero, Jesús Rangel Pérez, Jadlyn González de Urquiola

Artículos de divulgación

- Uso de redes neuronales artificiales para problemas de programación entera** 73-88
Using artificial neural networks for integer programming problems
Julián Silva Rodríguez, Andrés Fernández Rosas
- Metaheurísticas en ingeniería: una aproximación del estado del arte y sus implicaciones en la gerencia de construcción** 89-102
Metaheuristics in engineering: an approach to the state of the art and its implications for construction management
Nolberto Sarmiento Mireles, Eduardo Vargas Cano

- Normas para publicación** 103-104

Directora/ Editora—Fundadora

❑ Dra. Ninoska Maneiro Malavé †

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Agustín Mejías Acosta—Director/Editor

❑ Dra. Florangel Ortiz Zavala. Universidad de Carabobo, Venezuela

❑ Dr. Mervyn Márquez Gómez. Universidad Austral de Chile, Chile

❑ Dr. Humberto Gutiérrez Pulido. Universidad de Guadalajara, México

❑ Dra. Edith Martínez Delgado. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba

❑ Dra. Marianna Barrios León. Universidad de Carabobo, Venezuela

❑ Dr. (c) Víctor Andrés Kowalski. Universidad Nacional de Misiones, Argentina

❑ Dra. María Cannarozzo Tinoco. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

❑ Dr. (c) Iván Santelices Malfanti. Universidad del Bío-Bío, Chile

❑ Dra. María del Rosario Torres. Universidad de Carabobo, Venezuela

❑ Dr. Vicente Coll S. Universidad de Valencia, España

❑ Dra. Mayra D'Armas Renault. Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

❑ Dra. Cira Lidia Isaac. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba

❑ Dra. Ruth Illada García. Universidad de Carabobo, Venezuela

Comité Científico (lista parcial)

❑ Eduardo Vargas Cano, Universidad de Carabobo, Venezuela

❑ Juan Gabriel Triana Laverde, Universidad Agustiniana, Colombia

❑ María González García. Universidad Politécnica de Madrid, España

❑ Martín Cadena Badilla. Universidad de Sonora, México

❑ Javier E. Martínez Guirao. Universidad de Murcia, España

❑ Pedro Noboa Romero. Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

❑ Francisco Figueredo. Universidad del Carabobo, Venezuela

❑ Henry Hernández Vega. Universidad de Costa Rica, Costa Rica

❑ Luis Troccoli. Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador

❑ Julián David Silva Rodríguez. Universidad Manuela Beltrán, Uniminuto, Colombia

❑ Guillermo Flores Téllez. Asociación Mexicana de TRIZ

❑ Arturo Vega Robles. Universidad de Sonora, México

❑ Juan Carlos Michalus. Universidad Nacional de Misiones, Argentina

❑ Rodrigo Pessotto Almeida. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

❑ Enrique Flores Universidad del Carabobo, Venezuela

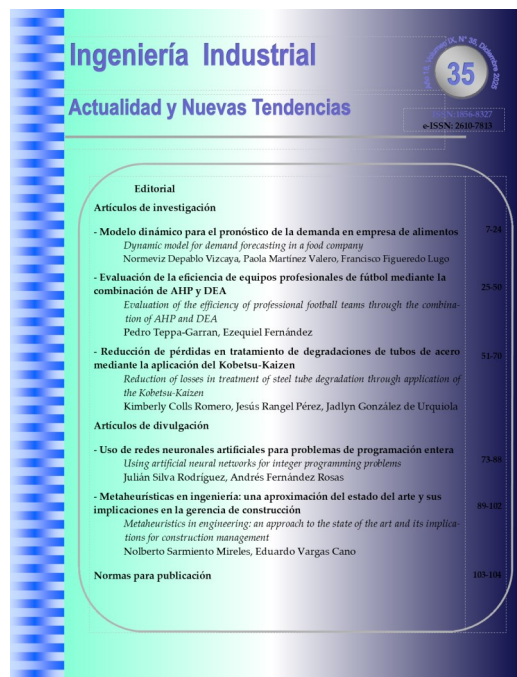
❑ Álvaro González-Angeles. Universidad Autónoma de Baja California, México

❑ João Helvio Righi de Oliveira. Universidad Federal de Santa María, Brasil

❑ Eduin Contreras. Universidad de Boyacá, Colombia

❑ Dunia Duque. Universidad Austral de Chile, Chile

❑ Jonatas Ost Scherer. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

JESSY DIVO DE ROMERO

Rectora

ULISES ROJAS

Vicerrector Académico

JOSÉ ÁNGEL FERREIRA

Vicerrector Administrativo

PABLO AURE

Secretario

Vanessa Hurtado

Decana - Facultad de Ingeniería

Francisco Figueredo Lugo

Director - Escuela de Ingeniería Industrial

REVISTA INGENIERÍA INDUSTRIAL: ACTUALIDAD Y NUEVAS TENDENCIAS.

Publicación Semestral editada y distribuida por la Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad de Carabobo. Av. Universidad, Facultad de Ingeniería. Bárbula, Estado Carabobo, Venezuela. CP 2005.

Contacto telefónico: 00-58-424-419.4096

e-mail: revistaiiaynt@gmail.com, revistaiiaynt@uc.edu.ve

Órgano de Difusión Científica y Tecnológica de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad de Carabobo. Valencia-Venezuela.

ISSN: 1856-8327 / e-ISSN: 2610-7813

Depósito Legal: pp200702CA2736

Registrada en la base de datos del Centro de Información y Documentación de la Universidad de Carabobo (<http://www.cid.uc.edu.ve>), en el Índice de Revistas Venezolanas de Ciencia y Tecnología—REVENCYT- (ULA-Venezuela), Actualidad Iberoamericana (CIT-Chile), REDALYC (UAEM-México), en el Catálogo LATINDEX (UNAM-México), en PERIODICA (UNAM-México) y en la Plataforma Sucupira/Qualis-CAPES (Brasil).

Tiraje: 300 Ejemplares

Año 18, Vol. IX, No 35, Diciembre 2025

Los artículos firmados son responsabilidad de su autor y no reflejan necesariamente el criterio de la institución, a menos que se especifique lo contrario. En caso de reproducción se agradece citar la fuente y enviar ejemplares del medio utilizado a la Escuela de Ingeniería Industrial, en la dirección dada previamente, a fin de acreditar la referencia al autor respectivo.



Tabla de contenido

Editorial

Artículos de investigación

- Modelo dinámico para el pronóstico de la demanda en empresa de alimentos** 7-24

Dynamic model for demand forecasting in a food company

Normeviz Depablo Vizcaya, Paola Martínez Valero, Francisco Figueredo Lugo

- Evaluación de la eficiencia de equipos profesionales de fútbol mediante la combinación de AHP y DEA** 25-50

Evaluation of the efficiency of professional football teams through the combination of AHP and DEA

Pedro Teppa-Garran, Ezequiel Fernández

- Reducción de pérdidas en tratamiento de degradaciones de tubos de acero mediante la aplicación del Kobetsu-Kaizen** 51-70

Reduction of losses in treatment of steel tube degradation through application of the Kobetsu-Kaizen

Kimberly Colls Romero, Jesús Rangel Pérez, Jadlyn González de Urquiola

Artículos de divulgación

- Uso de redes neuronales artificiales para problemas de programación entera** 73-88

Using artificial neural networks for integer programming problems

Julián Silva Rodríguez, Andrés Fernández Rosas

- Metaheurísticas en ingeniería: una aproximación del estado del arte y sus implicaciones en la gerencia de construcción** 89-102

Metaheuristics in engineering: an approach to the state of the art and its implications for construction management

Nolberto Sarmiento Mireles, Eduardo Vargas Cano

- Normas para publicación** 103-104

EDITORIAL

EDITORIAL

El Ingeniero Industrial ante la frontera tecnológica: Algoritmos, Eficiencia y el Futuro de la Optimización

La ingeniería industrial atraviesa una fase de sofisticación sin precedentes, donde la capacidad analítica se fusiona con la gestión operativa para redefinir los límites de la productividad. En este entorno, la formación del profesional debe ser integral; como plantea el equipo del Tecnológico de Monterrey (2024) en su análisis sobre la formación en ingeniería, el profesional del siglo XXI debe evolucionar hacia un perfil de "arquitecto de soluciones" capaz de equilibrar la alta eficiencia tecnológica con el bienestar social. Esta visión trasciende el entorno fabril tradicional, posicionando al ingeniero industrial como un líder capaz de gestionar la complejidad mediante el pensamiento sistémico.

En este número, *Depablo, Martínez y Figueredo* presentan un modelo dinámico para el pronóstico de la demanda en el sector alimentario, abordando uno de los retos más críticos de la cadena de suministro actual. Por otro lado, *Teppa-Garran y Fernández* demuestran la versatilidad de nuestra disciplina al evaluar la eficiencia de equipos profesionales de fútbol mediante la combinación de AHP y DEA. Esta integración de herramientas digitales debe manejarse con el rigor profesional que sugieren Ronen, Coman y Lieber (2025), quienes advierten que, ante el entusiasmo por la IA, el ingeniero debe saber distinguir qué tareas delegar y cuáles requieren un modo híbrido para evitar resultados "plausibles pero incorrectos" que comprometan la calidad operativa.

La búsqueda de la perfección operativa sigue siendo un pilar fundamental en la industria contemporánea. *Colls, Rangel y González* documentan la reducción de pérdidas en la industria del acero mediante la aplicación del Kobetsu-Kaizen, demostrando que la mejora enfocada sigue siendo la base para manejar los cuellos de botella y los recursos críticos en la manufactura moderna. Este esfuerzo por la excelencia técnica cobra mayor relevancia en un contexto global donde la optimización de procesos térmicos y mecánicos es la clave para la resiliencia de la industria pesada.

La vanguardia tecnológica se hace presente con el trabajo de *Silva y Fernández*, quienes exploran el uso de redes neuronales artificiales para resolver problemas de programación entera. Este avance se alinea con la visión de Marone (2025), quien destaca que el valor del ingeniero reside en reimaginar su rol para que el juicio humano actúe como el filtro

de calidad indispensable frente a las máquinas inteligentes. Complementando esta visión técnica, *Sarmiento y Vargas* ofrecen una aproximación al estado del arte de las metaheurísticas y sus implicaciones en la gerencia de construcción, proporcionando un marco estratégico para la toma de decisiones en proyectos de gran envergadura.

Ya sea mediante algoritmos avanzados o metodologías de mejora continua, la esencia de la ingeniería industrial permanece intacta: la optimización al servicio de la sociedad. Los autores de este número demuestran que mantener una mentalidad de vanguardia es, hoy más que nunca, una necesidad imperativa para liderar la transformación global.

Desde el Comité Editorial, agradecemos a los investigadores por sus valiosas contribuciones e invitamos a nuestra comunidad académica a seguir explorando los horizontes de nuestra profesión.

Por el Comité Editorial
Dr. Agustín Mejías Acosta
Diciembre, 2025

Referencias

- Marone, M. (25 de julio de 2025). *The fluid future of work: Rethinking roles in the age of intelligent machines*. Harvard Business Publishing. <https://www.harvardbusiness.org/insight/the-fluid-future-of-work-rethinking-roles-in-the-age-of-intelligent-machines/>
- Ronen, B., Coman, A., y Lieber, Z. (2025). Try This Today: Stay on Task. *Quality Progress*, 58(12), 80. <https://asq.org/quality-progress/articles/try-this-today-stay-on-task?id=e3547088028440e5959d5896c13f23bf>
- Tecnológico de Monterrey (2024). *IFE Insights Reports Formación en ingeniería en el siglo XXI: cuatro temas clave*. <https://doi.org/10.60473/VPG9-YZ80>



Artículos de Investigación

Artículos de Investigación

Modelo dinámico para el pronóstico de la demanda en empresa de alimentos

Dynamic model for demand forecasting in a food company

Normeviz Depablo Vizcaya, Paola Martínez Valero, Francisco Figueredo Lugo

Palabras clave: redes neuronales, métodos de pronóstico, sistema de empuje, cadena de suministro

Key words: neural networks, forecasting methods, push system, supply chain

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un modelo dinámico para el pronóstico de la demanda en una empresa productora de alimentos, con el fin de mejorar la precisión del proceso actual y disminuir la sobreestimación y subestimación de la demanda. Esta demanda genera importantes problemas para la empresa como: exceso de producción, ruptura de stock, insatisfacción de clientes, costos adicionales, entre otros. La metodología de la investigación es Proyecto Factible, Descriptivo, diseño de Campo y enfocado en una unidad de análisis. Se recopilaban datos históricos de ventas, se segmentaron los productos por el principio de Pareto y se diseñó una red neuronal recurrente multicapa con celdas LSTM combinada con métodos estadísticos tradicionales (Bootstrap). Se ajustaron los hiper parámetros del modelo y del entrenamiento. Se comparó el método de pronóstico actual de la empresa con el propuesto, realizando una evaluación estadística de los errores. El método propuesto obtuvo una precisión promedio del 94,11 % frente al 30,22 % del método actual, lo que representa una mejora promedio del 63,89 %.

ABSTRACT

The objective of this work is to design a dynamic model for demand forecasting in a food producing company, in order to improve the precision of the current process and reduce the overestimation and underestimation of demand. This generates substantial problems for the company such as: excess production, stock out, customer dissatisfaction and additional costs, among others. The research methodology is Feasible, Descriptive Project, field design and focused on a unit of analysis. Historical sales data was collected, products were segmented by the Pareto principle and a multilayer recurrent neural network was designed with LSTM cells combined with traditional statistical methods (Bootstrap). The model and training hyperparameters were adjusted. The company's current forecasting method was compared with the proposed one, performing a statistical evaluation of the errors. The proposed method obtained an average accuracy of 94.11 % compared to 30.22 % for the current method, which represents an average improvement of 63.89 %.

INTRODUCCIÓN

En el panorama empresarial actual, altamente competitivo y en constante evolución, el éxito de las empresas depende en gran medida de la toma de decisiones estratégicas en la gestión de la cadena de suministro. Como se citó en Chase y Jacobs (2009), Gates (1999) afirma que la supervivencia de la mayor parte de las empresas depende de las decisiones inteligentes sobre la cadena de suministro en especial de aplicar la tecnología e inteligencia para mejorar el desempeño de la misma.

En un mercado cambiante, las empresas deben pronosticar la demanda de productos, lo que puede resultar difícil, pero es esencial para evitar una reducción en los ingresos. Por lo tanto, la cadena de suministro debe ser ágil para responder rápidamente a los cambios en la demanda (Del Castillo, 2023). El autor resalta dos aspectos clave para que las empresas sean competitivas en un entorno cambiante: el pronóstico preciso de la demanda y la agilidad de la cadena de suministro.

Pronosticar es definido como el arte y la ciencia para predecir eventos futuros. Puede implicar el uso de datos históricos y su proyección hacia el futuro mediante algún modelo matemático. Puede ser una predicción subjetiva o intuitiva, o puede ser una combinación de ambos, es decir, un modelo matemático ajustado por el buen juicio del administrador (Render et al, 2007).

En el ámbito de la predicción de la demanda, el aprendizaje automático surge

como una herramienta potente para aprender patrones no sólo lineales como los métodos tradicionales para pronóstico. De acuerdo con Sandoval (2018) el aprendizaje automático se encarga de generar algoritmos que tienen la capacidad de aprender y no tener que programarlos de manera explícita.

Una de las aplicaciones más poderosas y de mayor crecimiento de la inteligencia artificial es el aprendizaje profundo (en inglés, *deep learning*). Se trata de un subcampo del aprendizaje automático que se utiliza para resolver problemas muy complejos y que normalmente implican grandes cantidades de datos (Rouhiainen, 2018). En este sentido Arana, (2021) explica que las Redes Neuronales Recurrentes (RNNs) son una clase de aprendizaje profundo basada en los trabajos de David Rumelhart en 1986. Las RNN son conocidas por su capacidad para procesar y obtener información de datos secuenciales. Según Nacelle (2009) el flujo de activación de las RNN va en una sola dirección: hacia delante y sólo se procede a la propagación hacia atrás para adecuar los pesos de cada neurona.

Las RNN tradicionales tienen un problema de memoria corta debido al descenso del gradiente, Arana (2021) afirma que para mitigar el problema de short-term memory, aparece un nuevo tipo de celda de memoria que sí es capaz de extraer patrones de secuencias de mayor longitud. Según Gaset (2022), las celdas LSTM permiten a las RNN recordar sus entradas durante un largo

período de tiempo, debido a que los modelos LSTM contienen su información en la memoria, que puede considerarse similar a la memoria de una computadora, en el sentido que una neurona de una LSTM puede leer, escribir y borrar información de su memoria,

En este proyecto se realiza una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre el uso de redes neuronales recurrentes (RNNs) para el pronóstico de la demanda. Se analizan los trabajos de autores como Almeyda (2022), Llerena (2022), Blanco et al. (2023), Ricce (2021), De La Cruz (2020) y Martínez y Ojeda (2018), quienes han

aplicado con éxito las Redes Neuronales para abordar problemas de pronóstico de demanda.

En este sentido, el objetivo de este proyecto es diseñar un modelo dinámico para el pronóstico de la demanda en una empresa productora de alimentos. La empresa en estudio es multinacional, está ubicada en el estado Carabobo, Venezuela y se dedica a la producción de alimentos como salsa a base de tomate, salsas negras, compotas para bebés, salsas a base de mostaza, pastas, jugos, bebidas gaseosas y dulces en distintos formatos.

METODOLOGÍA

El presente trabajo es un proyecto factible, con un diseño de campo y metodología descriptiva, centrado en una unidad de análisis.

Como primera fase se realizó un diagnóstico del proceso actual de pronóstico en el departamento de planificación de la producción en la empresa de alimentos. El mismo inicia con el pronóstico de la demanda, el cual debe restringir el Plan Agregado enviado por el equipo de mercadeo, evaluando tanto los insumos como los factores que influyen en la producción. Al desagregar el mencionado Plan, se garantiza tener disponibilidad de la materia prima cuyo proceso de abastecimiento comienza cuando el equipo de planificación de la producción envía el pronóstico al equipo de compras, para evitar que el tiempo de

respuesta del proveedor influya en la disponibilidad a tiempo del producto en planta. El proveedor debe enviar la materia prima a planta para cumplir el protocolo de recepción de MP; donde el equipo de Calidad toma muestras de los insumos y recursos para realizar pruebas fisicoquímicas y dimensionales, respectivamente, al ser aprobados son introducidos al almacén de MP.

El proceso de producción empieza al tener la demanda desagregada, la disponibilidad de MOD, disponibilidad de líneas y MP, el planificador de la producción envía las órdenes de trabajo al almacén de MP, donde al ser recibidas son identificadas las ubicaciones de los recursos e insumos para luego ser enviados al pesado y contabilizados de acuerdo con el FIFO y el FEFO. Seguidamente, son enviados al área

de predespacho de producción donde quedan a la espera del inicio del proceso producción.

En 2023, la empresa comenzó a implementar modelos matemáticos para el pronóstico de la demanda, la cual se centra en modelos estadísticos que consideran patrones lineales y en su mayoría horizontales, entre los cuales se encuentran la suavización exponencial simple y el promedio móvil ponderado.

Se utilizó el diagrama de Pareto para segmentar la problemática y determinar los productos que arrojaron mayor diferencia entre las ventas reales y lo pronosticado durante el año 2023, basado en el aporte de Ricce (2021) que utilizó el principio de Pareto para establecer los clientes que generan los mayores beneficios y concentrar el estudio en éstos (Ver tabla 1).

Tabla 1. Diferencia entre demanda pronosticada y ventas reales de la empresa

Causas	Diferencia	Acumulado
Demanda Sobreestimada	857.589	70 %
Demanda Subestimada	160.146	83 %
Falla de línea	64.898	88 %
Disponibilidad de materia prima	59.449	93 %
Prioridad otro SKU	56.984	98 %
Proyección de inventario inicial	24.627	100 %
Total	1.223.693	

En la Tabla 1, se observa el 80% de las causas es decir 1.017.735 cajas provienen de demanda sobreestimada y subestimada.

distribuido en las categorías que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Categorías, Demanda Sobreestimada y Subestimada

Categoría	Diferencia	Acumulado
Tomate	430.280	42 %
Bebés	236.793	69 %
Mostaza	65.566	77 %
Salsas para condimentar	52.594	83 %
Tomate condimentado	52.510	89 %
Pastas	40.559	94 %
Jugos	34.279	98 %
Bebidas gaseosas	20.595	100 %
Dulces	922	100 %
Total	1.017.735	

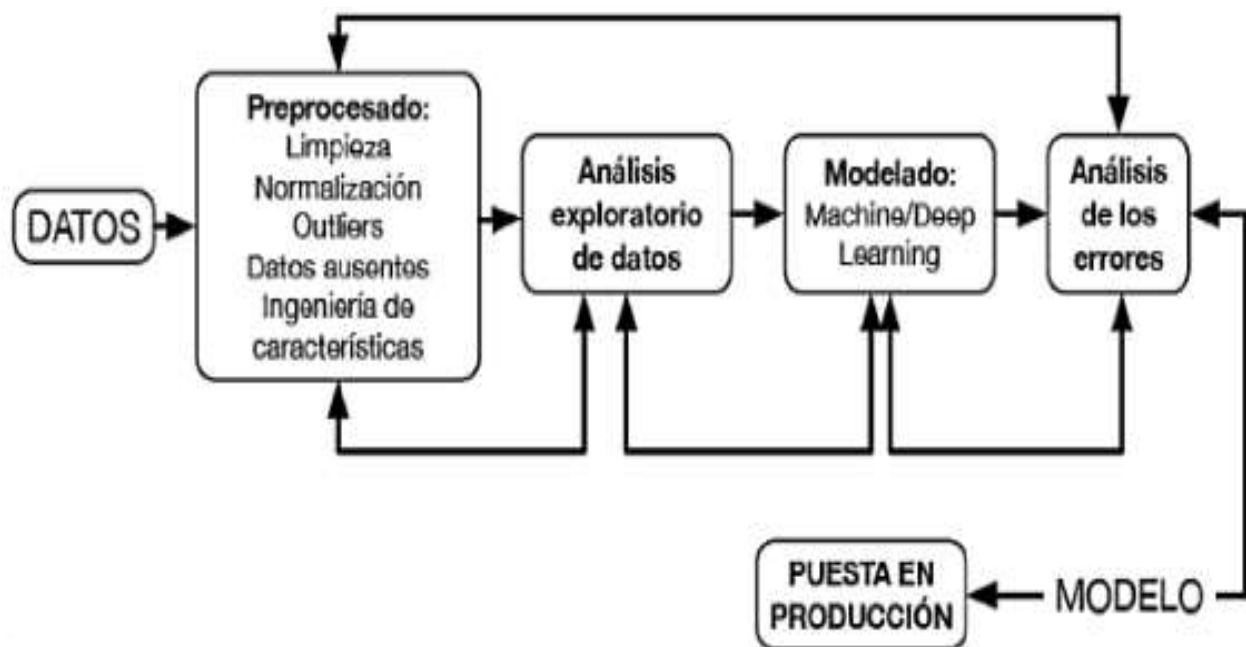
El 80% de las causas, el cual se representa por las categorías tomate, bebés, mostaza y salsas para condimentar, y con el ABC de ventas se seleccionaron los productos a estudiar, de los cuales resultaron 35 productos.

Para el análisis de datos, diseño y el desarrollo de la RNN se emplea el entorno Notebook Google Colab, lenguaje de

programación Python, las bibliotecas Tensor Flow, Keras, Scikit-Learn, Numpy, Scipy, Statsmodels, Pandas,

En la fase dos donde se identificaron las variables que impactan en el pronóstico de la demanda se tomaron como base las etapas del análisis de datos como es muestra en la figura 1 (Soria et al. 2023).

Figura 1. Etapas del Análisis de Datos



Para la normalización de los datos, la base fue tomada de Flores et. al (2021) para establecer las pruebas de hipótesis, quien recomienda utilizar la prueba de Shapiro-Wilk para muestras menores a 50 datos y para muestras mayores a 50 la prueba Kolmogórov-Smirnov en su corrección Lilliefors, las cuales tienen como hipótesis nula que los datos se comportan de forma normal y ésta se rechaza si el valor p es menor a alfa establecido como 0,05 es decir un 95% de confianza.

Para el tratamiento de los datos atípicos se toma como base el aporte de Angarita (2023), quien propone tres alternativas: mediante asimetría y curtosis, mediante rango intercuartil y mediante clustering, seleccionando el rango intercuartil, debido a que éste incluye implícitamente el análisis de asimetría y curtosis, además que no involucra tanto desarrollo algorítmico como el clustering.

En cuanto al manejo de datos atípicos, se considera el aporte de Gallo et al. (2021),

quienes proponen sustituir valores atípicos con un promedio de k valores vecinos, pronosticar los valores con un método predictivo y eliminar las observaciones. Se seleccionó la sustitución de valores atípicos con un promedio de k valores vecinos con el uso del algoritmo K-NN de Python que consigue el K óptimo para cada producto, debido a que pronosticar es uno de los objetivos de la investigación y se necesita la secuencia de ellos, por lo que eliminar datos no sería recomendable. La resultante para esta etapa fue el siguiente procedimiento:

1. El parámetro de interés: demanda del producto, Hipótesis nula (H_0): la demanda del producto sigue una distribución normal e Hipótesis alternativa (H_1): la demanda del producto no sigue una distribución normal.
2. Nivel de significancia $\alpha=0,05$ con una confianza del 95 %.
3. Estadístico de prueba
4. Se rechaza la hipótesis nula si el valor $p < \alpha$
5. Si los datos no son normales se procede a identificar los datos atípicos con el uso del rango intercuartil.
6. Los datos atípicos son sustituidos mediante el promedio de los k vecinos más cercanos.
7. Se vuelve a probar la hipótesis de normalidad.

Para comprender el comportamiento de la demanda de cada producto a lo largo del tiempo, se realizó un análisis de sus series temporales. De acuerdo con Villavicencio (2010), una serie temporal es una secuencia

de observaciones, medidos en determinados momentos del tiempo, ordenados cronológicamente y, espaciados entre sí de manera uniforme, así los datos usualmente son dependientes entre sí. El mismo autor clasifica las series de tiempo en estacionaria y no estacionaria, se considera estacionaria si sus propiedades estadísticas, como la media y la varianza, permanecen constantes a lo largo del tiempo.

Para determinar si una serie de tiempo es estacionaria, se utiliza la prueba de Dickey-Fuller explicada por Asteriou (2002). Esta prueba estadística evalúa la presencia de una raíz unitaria en la serie. La hipótesis nula de la prueba es que la serie tiene una raíz unitaria, lo que significa que no es estacionaria. Si el valor p de la prueba es menor que el nivel de significancia (α), establecido en 0,05, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que la serie es estacionaria.

En el caso de series de tiempo no estacionarias, se debe aplicar un proceso de desestacionalización antes de realizar la descomposición. Para ello, se utiliza el método multiplicativo, propuesto por Chase y Jacobs (2009). Los modelos de descomposición son: aditivo y multiplicativo, estos dividen las series de tiempo en sus componentes: tendencia, estacionalidad y residuos. Se siguió el siguiente procedimiento:

1. Se prueba la estacionalidad mediante Dickey-fuller, Hipótesis nula (H_0): la demanda del producto no estacionaria e Hipótesis alternativa

(H₁): la demanda del producto es estacionaria

2. Nivel de significancia $\alpha=0,05$ con una confianza del 95%.

3. Estadístico de prueba es análogo al de una t student pero sigue una distribución distinta por lo que se utiliza el valor crítico obtenido de la tabla Dickey Fuller

4. Se rechaza la H₀ si Estadístico < valor crítico

5. Si la serie de tiempo tiene más de 24 datos es decir más de 2 años se realiza la descomposición de la serie de tiempo.

6. Si la serie de tiempo es estacionaria se usa el método aditivo sino multiplicativo.

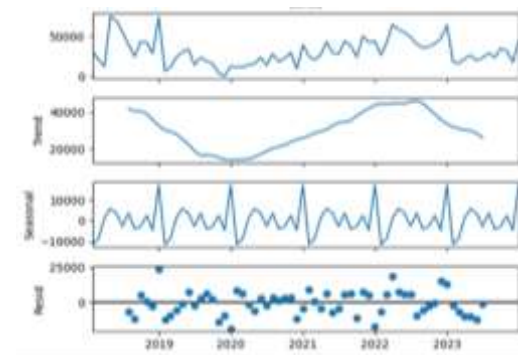
7. Mediante el método visual se observa la tendencia y la estacionalidad.

El análisis de las series de tiempo permitió identificar diferentes tipos de estacionalidades y tendencias en los datos. Se encontraron estacionalidades anuales, semestrales, cuatrimestrales y trimestrales, lo que indica que la demanda de algunos productos presenta patrones recurrentes en diferentes intervalos de tiempo. También se observaron tendencias tanto lineales como no lineales en los datos (Ver figuras 2, 3, 4, 5 y 6).

Tomate 400 g

Comportamiento: Normal, estacionario, tendencia no lineal y estacionalidad semestral.

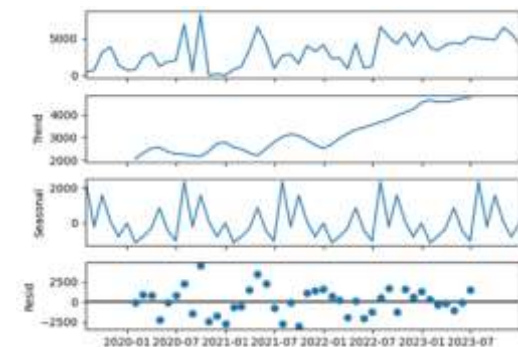
Figura 2. Descomposición Tomate 400 g



Tomate clase B 400 g

Comportamiento: Normal, estacionario, tendencia no lineal y estacionalidad semestral.

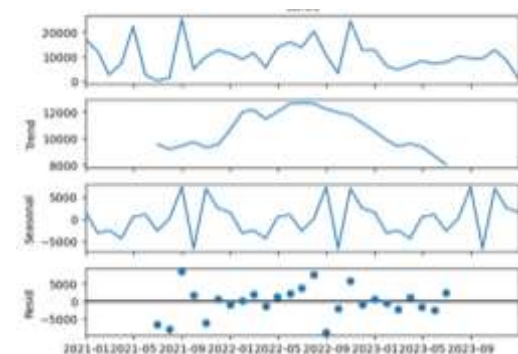
Figura 3. Descomposición Tomate clase B 400g



Bebés Pera 200 g

Comportamiento: Normal, estacionario, tendencia no lineal y estacionalidad cuatrimestral.

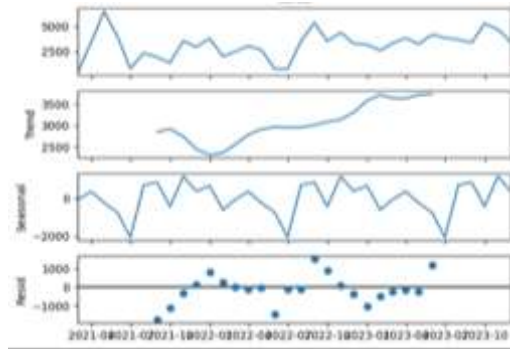
Figura 4. Descomposición Bebés Pera 200 g



Bebés Plástico Manzana 100 g

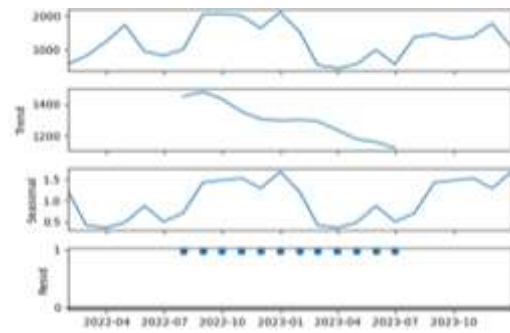
Comportamiento: Normal, estacionario, aproximado lineal y trimestral.

Figura 5. Descomposición Bebés Plástico Manzana 100 g

**Bebés Plástico Uva 200 g**

Comportamiento: Normal, no estacionario, aproximado lineal y trimestral.

Figura 6. Descomposición Bebés Plástico Uva 200 g



Se analizaron los datos de 35 productos para determinar la normalidad y estacionariedad. De estos productos, solo tres no presentaron datos atípicos y no se pudieron normalizar: Tomate clase B 200 g, Bebés piña 200 g y uva 100 g. Sin embargo, en nueve productos sí se identificaron valores atípicos, pero no fue posible normalizar los datos: Tomate 200 g, Bebés manzana 200 g, Manzana 100 g, fresa 200 g,

fresa 100 g, piña 100 g, durazno 100g, uva 200g y durazno 200 g.

Adicionalmente, se encontró que siete de los 35 productos no son estacionarios: Mostaza 3000 g, 100 g y 10 g, Bebés plástico Piña 100 g, durazno 100 g, uva 200 g y Salsa 100 g, los otros 28 productos presentaban series estacionarias, lo que significa que sus propiedades estadísticas (media, varianza) permanecían constantes en el tiempo.

Continuando el proceso investigativo, en la fase tres se elaboró la propuesta, en la cual se diseñó una red neuronal multicapa de celdas LSTM cuyos hiper parámetros del modelo fueron establecidos tomando como base el aporte de Blanco et al. (2023), el cual propone probar con 50 neuronas para cada capa de celdas LTSM, en su trabajo de grado la problemática era más compleja teniendo una arquitectura de 5 capas LSTM con una capa de dropout (dilución) del 20%. En la tabla 3 se presentan las características de la RNN diseñada.

En este proyecto, se consideró como punto de partida para el entrenamiento, establecer los hiper parámetros de éste usando como referencia el producto con mayor cantidad de datos ya que es considerado el que contiene mayor información. Se crearon nuevos conjuntos de datos que se ajusten al tamaño del producto de mayor cantidad de datos utilizando la herramienta bootstrap, lo que permite obtener una estimación más robusta del rendimiento del modelo y realizar ajustes más precisos a los otros productos.

Tabla 3. *Hiper Parámetros del Modelo*

	Características
Vector de entrada	Es de dos dimensiones, donde la primera dimensión representa el número de pasos de tiempo (en este caso, 1) y la segunda dimensión representa la característica (valor de venta).
Capa LSTM 1	Procesa la secuencia de datos escalados. Contiene 50 unidades ocultas. Devuelve la salida para cada paso de tiempo.
Dropout	Con una tasa de deserción del 20% para prevenir el sobreajuste.
Capa LSTM 2	Procesa la salida de la capa LSTM 1. Contiene 50 unidades ocultas. No devuelve la salida para cada paso de tiempo.
Capa Densa	La capa densa final transforma la representación vectorial compleja de la capa LSTM 2 en un valor escalar. Contiene una sola neurona. Genera la predicción de ventas para el siguiente paso de tiempo.
Función de activación	tanh

Cabe destacar, que de acuerdo con Núñez (2000), la idea principal de los métodos bootstrap es el remuestreo a partir de los datos originales ya sea en forma directa o vía un modelo ajustado; con la finalidad de obtener muestras replicadas a partir de las cuales se pueda evaluar la variabilidad de las cantidades de interés sin incurrir en errores de cálculos analíticos.

El entrenamiento se centró en establecer un número de épocas que arroje un error del 5% para evitar el sobreajuste, Nanclares (2021) explica que las épocas son el número de iteraciones al conjunto de entrenamiento, se probó con 5, 20, 40 y 80 épocas, los demás hiper parámetros de entrenamiento se tomaron del aporte de Blanco et al. (2023).

En la figura 7 se puede observar que el entrenamiento con 5 épocas está incompleto. En la figura 8 se puede observar que el entrenamiento con 80 épocas da un resultado de pronóstico

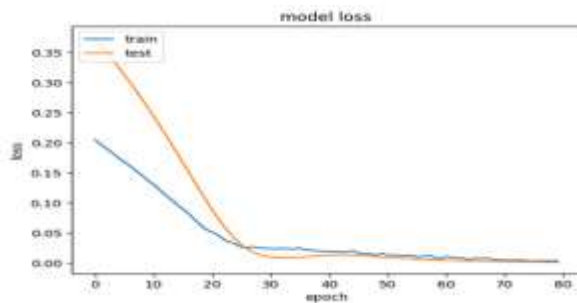
mucho más preciso, obteniendo en la figura 9, la curva de validación para las 80 épocas.

Figura 7. *5 Épocas con Producto de Mayor Cantidad de Datos*



Figura 8. *80 Épocas con Producto de Mayor Cantidad de Datos*



Figura 9. Curva de validación para 80 épocas

Se observa que la curva de validación comienza a aumentar después de la época 80. Esto indica que el modelo está comenzando a sobre ajustarse a los datos de entrenamiento, entonces se detienen las pruebas. La línea roja representa el MSE del modelo durante el entrenamiento, se observa que la curva desciende gradualmente a lo largo de las épocas, lo que indica que el modelo mejora su precisión con el entrenamiento, la línea azul representa el MSE del modelo en un conjunto de datos de validación independiente. Este conjunto de datos no se utiliza para entrenar el modelo, sino para evaluar su generalización a datos nuevos. Se observa que la curva de validación sigue una tendencia similar a la curva de entrenamiento y el punto de intersección está en un punto bajo del MSE, lo que indica que el modelo ha aprendido patrones generales sin sobre ajustarse a los datos específicos del entrenamiento.

En general, se estableció el siguiente procedimiento para crear la red neuronal multicapa de celdas LSTM :

1. Escalar los valores de entrada a un rango entre 0 y 1, para que las neuronas aprendan de manera más uniforme y eficiente, acelerando la convergencia del

entrenamiento y mejorando la precisión del modelo.

2. Identificar vector de entrada.
3. Seleccionar el 80 % de los datos escalados como conjunto de entrenamiento, este conjunto se utiliza para ajustar los pesos de la red neuronal durante el proceso de entrenamiento.
4. El 20 % restante de los datos escalados se reserva como conjunto de prueba, este conjunto se utilizará para evaluar el rendimiento del modelo una vez entrenado.
5. Establecer que sea secuencial.
6. Establecer las cantidades de capas LSTM que contiene el modelo y para cada una se fija la cantidad de neuronas.
7. Asignar una capa Dropout de 20 % de deserción, para ayudar a prevenir el sobreajuste del modelo al eliminar aleatoriamente un porcentaje de las neuronas durante el entrenamiento.
8. Agregar una capa densa final con una neurona, esta capa transforma la representación vectorial compleja en un valor escalar, que representa la predicción de ventas para el siguiente paso de tiempo.
9. Entrenar el modelo.

La última fase consistió en la validación de la propuesta mediante un análisis estadístico, ejecutando las corridas del modelo propuesto con los pronósticos sugeridos y los datos de la situación actual presentando gráficas donde se comparen los resultados obtenidos con el modelo propuesto y el modelo actual.

Soria (2023) explica que para validar un modelo de machine learning o deep

learning hay que analizar la calidad de su rendimiento mediante diferentes medidas de error que se pueden usar para comparar con otros modelos y elegir finalmente el que mejor se adecue al problema de los datos, en este caso es importante mencionar el sesgo y la varianza.

Para establecer la confiabilidad de los resultados del modelo se toma como base

el aporte de Sipper (1998), el cual demostró que DAM/0,8 es una buena estimación de la desviación estándar aun para una distribución no normal. Su estudio empírico mostró que para distribuciones uniforme, exponencial o triangular, la constante sólo varía entre 0,74 y 0,86, por lo que 0,8 es igualmente una buena aproximación (Ver tabla 4).

Tabla 4. Interpretación de los resultados

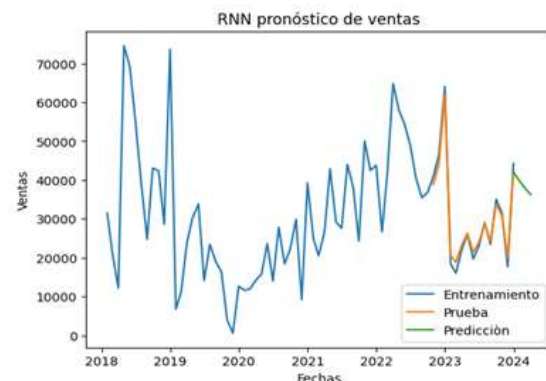
Parámetro	Interpretación
Error medio (EM)	EM > 0 en promedio, se subestimó la demanda
	EM = 0, hay error, pero el pronóstico este alrededor de la demanda
	EM < 0 En promedio se subestimó la demanda
Error cuadrático medio (ECM)	ECM > 0 hubo error
	ECM = 0, la demanda es igual al pronóstico
	ECM < 0 imposible
Desviación media absoluta (DMA)	DMA > 0 hubo error
	DMA = 0, la demanda es igual al pronóstico
	DMA < 0 imposible
Precisión	Un valor de RMSE bajo indica que el modelo de pronóstico es preciso y genera predicciones cercanas a los valores reales.

RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos del modelo de red neuronal multicapa recurrente con celdas Long Short-Term Memory (LSTM) desarrollado para el pronóstico de la demanda. Se analizará el rendimiento del modelo en términos de precisión y se compararon los resultados del modelo LSTM con los pronósticos obtenidos mediante el método actual, destacando las mejoras y avances logrados (Ver figuras 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16).

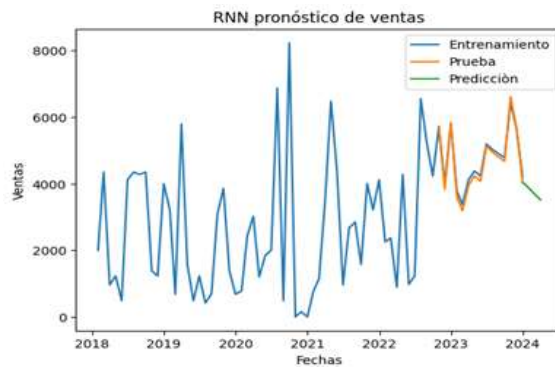
Tomate 400 g: Precisión: 94,84 %.

Figura 10. Pronóstico Tomate 400 g



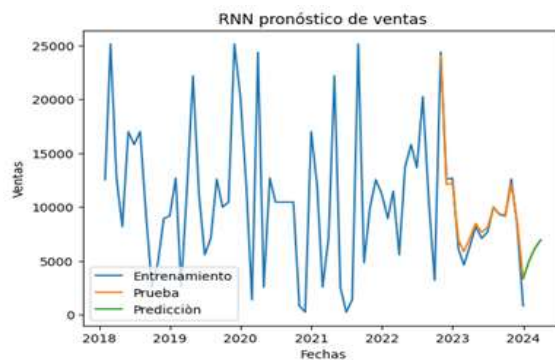
Tomate clase B 400 g: Precisión: 97,53%.

Figura 11. Pronóstico Tomate clase B 400 g



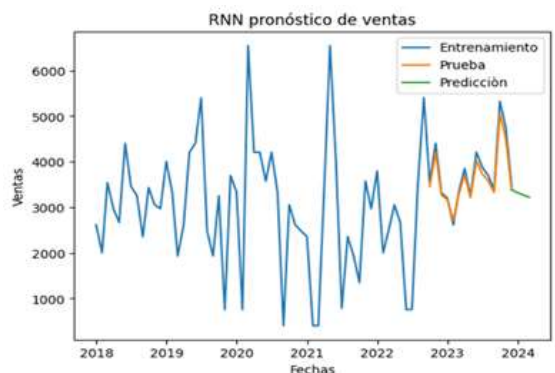
Bebés Pera 200 g: Precisión 93,63 %.

Figura 12. Pronóstico Bebés Pera 200 g



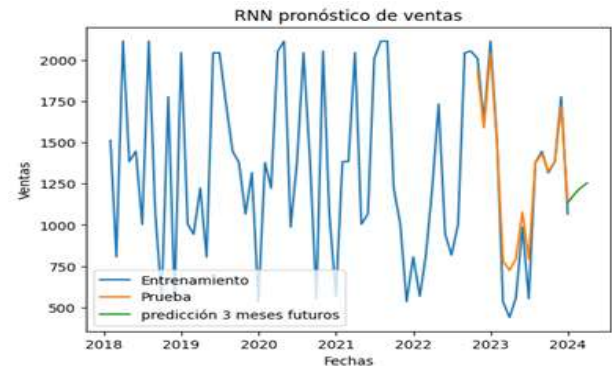
Bebés Plástico Manzana 100 g: Precisión 96,76 %.

Figura 13. Pronóstico Bebés Plástico Manzana 100 g



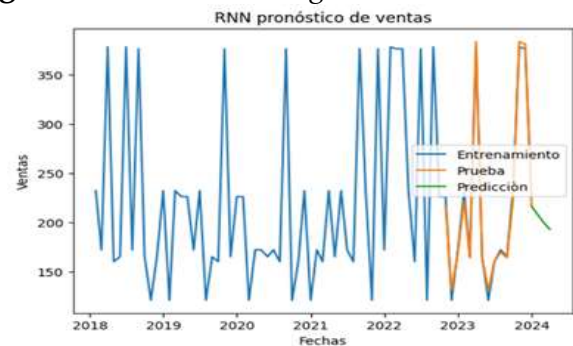
Bebés Plástico Uva 200 g: Precisión: 91,32%.

Figura 14. Pronóstico Bebés Plástico Uva 200g



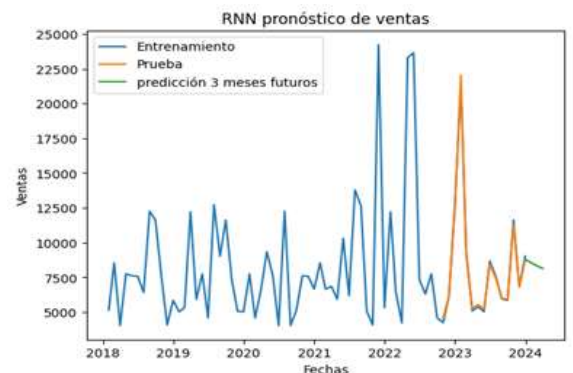
Mostaza 3000 g: Precisión: 97,47 %, normal, menor a 24 meses, no estacionario.

Figura 15. Mostaza 3000 g



Tomate 200 g: Precisión: 94,49 %, no normal.

Figura 16. Pronóstico Tomate 200 g



Los resultados de pronóstico de la LSTM-RNN de valores futuros a 3 meses (De Enero a Marzo de 2024) tomando como último dato de todas las series de tiempo el valor de las ventas de Diciembre de 2023.

Es importante considerar el intervalo de confianza al 95%, el cual indica que existe una cierta variabilidad en las predicciones. Esto significa que la demanda real podría ser mayor o menor que los valores pronosticados dentro de

este rango considerando el aporte de Sipper (1998). Seguidamente los resultados de los productos mencionados anteriormente (Ver tabla 5).

Por último, en las figuras 17, 18, 19, 20, 21, 22 y 23 se muestran los resultados de la comparación estadística del modelo propuesto y el modelo actual utilizado por la empresa para determinar cuál método proporciona mejor resultado usando para esto la desviación media absoluta (DMA).

Tabla 5. Pronóstico 3 meses futuros

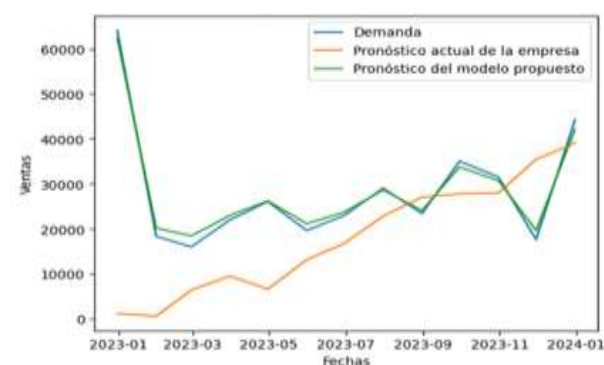
Nombre	Enero	Febrero	Marzo	Normal	DMA	Intervalo de Confianza 95 %
Tomate 400 g	39.841,60	37.937,33	36.248,29	X	1.574,90	3.858,60
Tomate 200 g	8.551,85	8.336,96	8.138,10	X	223,70	548,10
Tomate clase B 400g	3.871,89	3.696,06	3.514,87	X	117,80	288,50
Bebés Pera 200 g	4.993,10	6.121,69	6.932,05	X	593,30	1.453,50
Bebés plástico	3.319,88	3.266,28	3.222,68	X	121,40	297,50
Manzana 100 g						
Bebés plástico Uva 200 g	1.184,83	1.123,26	1.252,77		97,60	
Mostaza 3000 g	207,61	202,60	192,83	X	5,50	13,60

Tomate 400 g

DMA modelo actual: 13.716,7814 cajas

DMA modelo propuesto: 1.285,3113 cajas.

Figura 17. Modelo Actual vs Modelo Propuesto Tomate 400 g

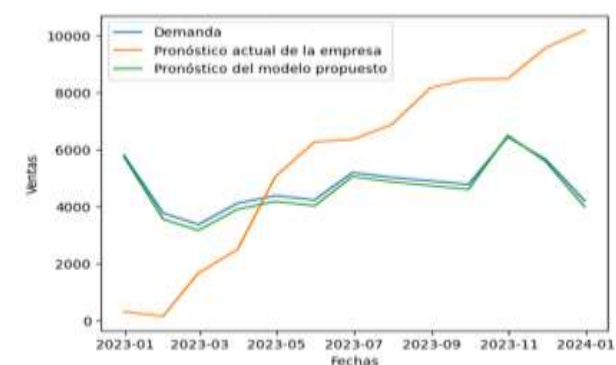


Tomate clase B 400 g

DMA modelo actual: 2.848,0271 cajas

DMA modelo propuesto: 159,7510 cajas

Figura 18. Modelo Actual vs Modelo Propuesto Tomate clase B

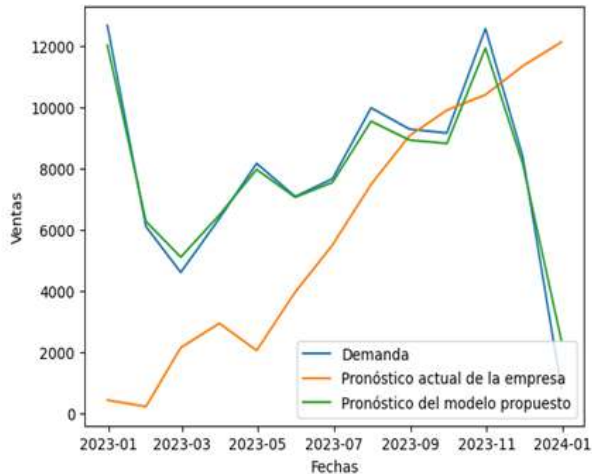


Bebés Pera 200 g

DMA modelo actual: 4.260,2321 cajas

DMA modelo propuesto: 411,2157.cajas

Figura 19. *Modelo Actual vs Modelo Propuesto Bebés Pera 200 g*

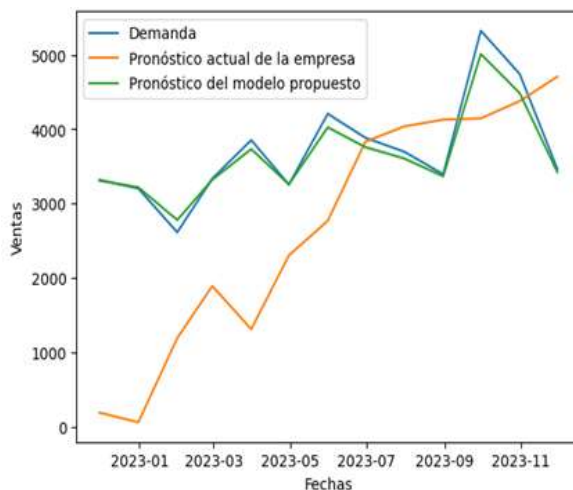


Bebés Plástico Manzana 100 g

DMA modelo actual: 1.382,7862 cajas

DMA modelo propuesto: 105,5871 cajas

Figura 20. *Modelo Actual vs Modelo Propuesto Bebés plástico manzana 100 g*

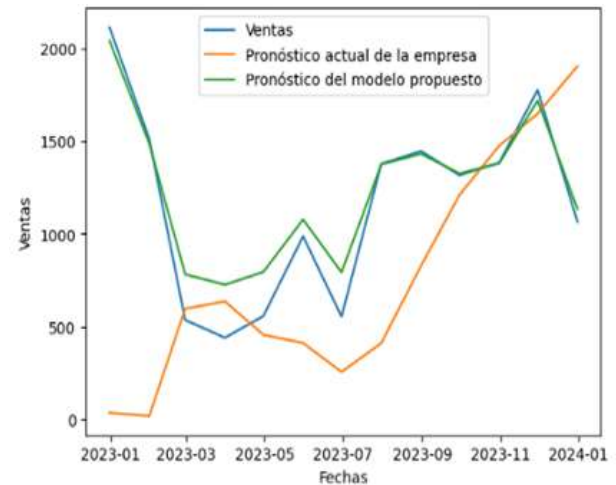


Bebés Plástico Uva 200 g

DMA modelo actual: 580,9 und

DMA modelo propuesto: 104.und

Figura 21. *Modelo Actual vs Modelo Propuesto Bebés plástico uva 200 g*

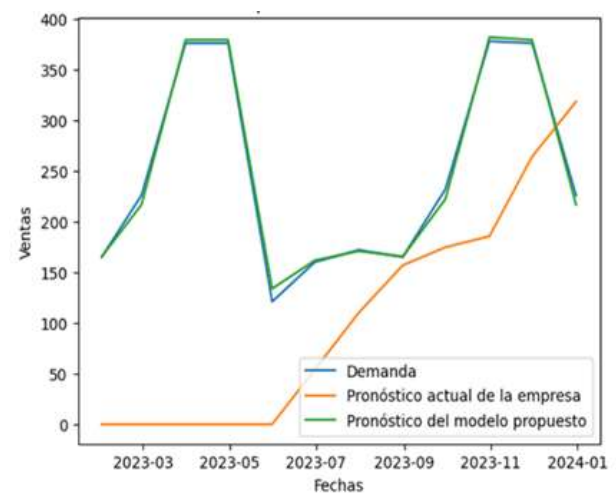


Mostaza 3000 g

DMA modelo actual: 157,86 cajas

DMA modelo propuesto: 4,91 cajas

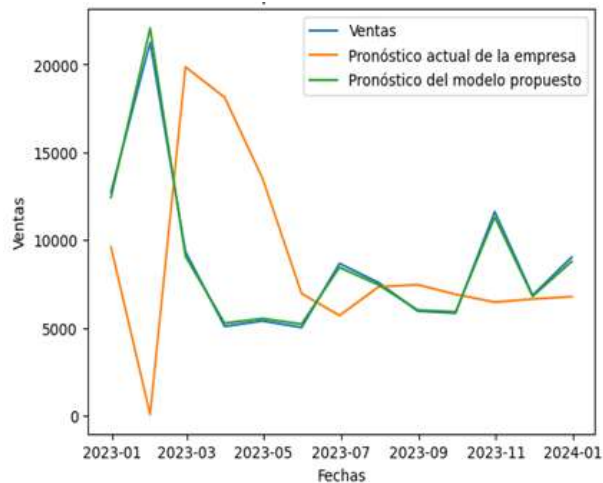
Figura 22. *Modelo Actual vs Modelo Propuesto Mostaza 3000 g*



Tomate 200 g

DMA modelo actual: 5.481,8207 cajas

DMA modelo propuesto: 297,65 cajas

Figura 22. *Modelo Actual vs Modelo Propuesto*
Tomate 200 g**Discusión de los resultados**

En el pronóstico de 3 meses futuros, se consiguieron 5 de los 35 productos estudiados cuyo comportamiento de los errores no es normal, pero basándose en la contribución de Sipper. (1998) y luego de

evaluar con prueba de hipótesis de comportamiento uniforme aceptando ésta para los 5 productos se confirma que los resultados son confiables. Los mismos fueron Tomate clase B 200 g, Bebés piña 200 g, piña 100, uva 200 g y Bebés plástico uva 200 g.

Se utiliza la desviación media absoluta DMA para comparar cuál método proporciona mejores resultados como propone Soria (2023) resultado para todos los productos que el método propuesto es mejor ya que para todos se consiguió una DMA menor que el método actual utilizado por la empresa.

Se observa que para todos los productos disminuyó la subestimación y la sobre estimación de la demanda de acuerdo con la desviación media absoluta, obteniendo una precisión promedio del modelo propuesto de 94,11 %, en comparación del método actual utilizado por la empresa que tiene en promedio 30,22 % de precisión, mejorando en promedio, un 63,89 %.

CONCLUSIONES

En conclusión, en el análisis exhaustivo, se evaluó el proceso actual de pronóstico de demanda en la empresa en estudio utilizando el principio de Pareto, cuya finalidad era identificar las áreas que generan el mayor impacto en la precisión del pronóstico y enfocar los esfuerzos de mejora en esas áreas críticas. El análisis de Pareto reveló que un pequeño porcentaje de los productos (alrededor del 20%) genera una gran parte del error total de

pronóstico (alrededor del 80%) con un total de la diferencia entre el pronóstico y las ventas reales en cajas de 1.223.693, de las cuales 1.017.735 pertenecen a la categoría tomate, bebés, mostaza y condimentados, resultando como principal problemática la demanda sobreestimada y subestimada.

Así mismo, se lograron identificar las variables mediante el uso de herramientas estadísticas tradicionales para conocer el comportamiento de la demanda de los

distintos productos, dándonos certeza que algunos de los datos tienen una distribución conocida como la normal, confirmando ésto con pruebas de hipótesis como lo son la prueba de Lilliefors y la de Saphiro Wilk con un 95% de confianza; así como identificar los datos atípicos, los cuales se alejan del comportamiento normal de los productos. Para ello, se utilizaron herramientas como el método de caja o el rango intercuartil y posteriormente sustituir estos datos para no perder la secuencia de las datas históricas, utilizando el método de k vecinos más cercano, logrando normalizar algunos de los comportamientos de las demandas de los productos, aunque también otros no se lograron normalizar. Con el uso de la prueba de hipótesis de Dickey-Fuller se identificaron aquellas series de tiempo que se comportan de forma estacionaria y no estacionaria. Por ser importante para el estudio, también se utilizó la descomposición clásica con el análisis visual, de lo cual se identificaron las tendencias tanto lineales como no lineales y las estacionalidades: trimensuales, cuatrimestrales, semestrales y anuales, esto con la finalidad, de determinar el comportamiento de los datos para ser introducidos al modelo.

Las redes neuronales recurrentes (RNN), particularmente las de tipo Long Short-Term Memory (LSTM), han demostrado ser herramientas poderosas para modelar secuencias de datos y capturar

dependencias a largo plazo, estas se combinaron con métodos estadísticos tradicionales como el bootstrap hicieron una herramienta que se puede utilizar para todos los productos de la empresa de alimentos, con una precisión mayor al 80% en todos los casos. Además, se concluye que el método propuesto tiene mejor ajuste que el método actual en términos de errores de pronóstico como el error medio que nos indicó, demandas sobreestimada y subestimada, pero en menor cantidad que el método actual de la empresa, el error cuadrático y error absoluto que para todos los productos indicó que el método propuesto es más preciso que el método actual.

Se concluye que la implementación de un modelo multicapa de redes recurrentes de celdas LSTM puede ser una solución efectiva para mejorar la precisión del pronóstico de la demanda y mantenerla en el tiempo. Este tipo de modelo permite capturar mejor las relaciones temporales y patrones complejos en los datos de demanda, lo que ayuda a predecir con mayor precisión las necesidades futuras de producción; esta predicción resulta crucial para la toma de decisiones en el departamento de planificación de la producción, debido a que el modelo ajusta los pesos para obtener una precisión constante en el tiempo y confiable para optimizar los recursos y evitar problemas de sobre o sub producción lo que hace que se garantice la eficiencia operativa.

REFERENCIAS

- Almeyda, E. (2022). *Pronóstico de la demanda internacional del banano orgánico de Perú usando algoritmos de Machine Learning*. [Tesis Doctoral]. Universidad de Piura, Perú.
<https://hdl.handle.net/11042/5718>
- Angarita, A. (2023). *¿Cómo detectar y tratar los outliers?*. Siepsi.
<https://siepsi.com.co/2023/06/16/como-detectar-y-tratar-los-outliers/>
- Arana, C. (2021). *Redes neuronales recurrentes: Análisis de los modelos especializados en datos secuenciales*, Serie Documentos de Trabajo, No. 797. Universidad del Centro de Estudios Macroeconómicos de Argentina (UCEMA).
<https://hdl.handle.net/10419/238422>
- Asteriou, D. (2002). *Notas sobre Análisis de Series de Tiempo: Estacionariedad, Integración y Cointegración*. Webdelprofesor, Universidad de Los Andes, ULA.
<https://webdelprofesor.ula.ve/economia/hmat/a/Notas/Notas%20sobre%20Analisis%20de%20Series%20de%20Tiempo.pdf>
- Blanco, I., García, S. J., & Remesal, Á. (2023). Aprendizaje profundo para series temporales en finanzas: aplicación al factor momentum. En Funcas (Ed.), *Análisis financiero y big data* (Capítulo V, pp. 123–148). Funcas.
<https://www.funcas.es/wp-content/uploads/2023/05/Analisis-financiero-y-big-data-Capitulo-V.pdf>
- Chase, R. y Jacobs, R. (2009). *Administración de operaciones Producción y cadena de suministros*. McGraw-Hill / Interamericana.
- Del Castillo, S. (2023). *Logística 4.0: Innovación y eficiencia en la cadena de suministro*, 1era Edición. Doxa Edition.
- De La Cruz, C. (2020). *Previsión De La Demanda Mediante Deep Learning* [Trabajo fin de Máster, Universidad de Sevilla]. idUS. Depósito de Investigación de la Universidad de Sevilla.
<https://hdl.handle.net/11441/106992>
- Flores, C. y Flores, K. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de los datos en procesos productivos: Anderson- Darling, Ryan- Joiner, Shapiro- Wilk y Kolmogorov- Smirnov. *Societas. Revista de Ciencias Sociales y Humanísticas*, 23(2), 83-106.
<https://portal.amelica.org/ameli/journal/341/3412237018/3412237018.pdf>
- Gallo, A.; Pérez, F.; Salinas, D. (2021). Minería de Datos y Proyección a Corto Plazo de la Demanda de Potencia en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano. *Revista Técnica "energía"*, 18(1), 72-85.
<https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/461/644>
- Gaset, C. (2022). *Redes neuronales recurrentes aplicadas a series de tiempo: predicción de pasajeros de rutas regionales en Argentina*. [Tesis Master, Universidad Torcuato di Tella]. Repositorio Digital Universidad Torcuato Di Tella.
<https://repositorio.utdt.edu/handle/20.500.13098/11575>
- Llerena, R. (2022). *Propuesta de un Modelo Matemático aplicado al pronóstico de Producción utilizando Redes Neuronales Artificiales empleado en una Fábrica de Cajas de Seguridad Modelo 39SS*. [Tesis Maestría, Universidad Estatal de Milagro]. Repositorio Institucional de la Universidad Estatal de Milagro UNEMI.
<http://repositorio.unemi.edu.ec/handle/123456789/6423>
- Martínez, D. y Ojeda, A. (2018). *Análisis de diferentes métodos de pronóstico en la cadena de suministro a través de un modelo dinámico de simulación*. [Trabajo Especial de Grado no publicado Universidad de Carabobo]. Universidad de Carabobo.

- Nacelle, A. (2009). *Las redes neuronales artificiales: de la biología a los algoritmos de clasificación*. [Monografía]. Universidad de la República Uruguay.
- Nanclares, J. (2021). *Redes Neuronales recurrentes para la predicción de series temporales*. [Trabajo de Grado, Universidad Autónoma de Madrid]. Repositorio Institucional UAM. <https://repositorio.uam.es/server/api/core/bitstreams/8eeee004-ea2b-4b05-98f3-cdf40db99fb2/content>
- Núñez, G. (2000). Introducción al Bootstrap y sus aplicaciones. En *INEGI, Memorias del XIV Foro Nacional de Estadística* (pp. 81–86). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Render et al., (2007). *Administración de la producción, Primera Edición*. Pearson Educación.
- Ricce, E. (2021). *Pronóstico de demanda altamente variable e intermitente usando un modelo básico de Red Neuronal Artificial para disminuir el riesgo de rotura de stock de una compañía que abastece productos en Sudamérica*. [Trabajo de Grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/657936>
- Rouhiainen, L. (2018). *Inteligencia Artificial 101 Cosas que debes saber hoy sobre nuestro futuro*. Planeta.
- Sandoval, L. (2018). Algoritmos de aprendizaje automático para análisis y predicción de datos. *Revista Tecnológica*, 11, 36-40. http://www.redicces.org.sv/jspui/bitstream/10972/3626/1/Art6_RT2018.pdf
- Sipper, D. (1998). *Planeación y control de la producción*. McGraw Hill Interamericana Editores S.A.
- Soria, E., Sánchez-Montañés, M., Gamero, R., Castillo, B. y Cano, P. (2023). *Sistemas de aprendizaje automático*. Ra-Ma.
- Villavicencio, J. (2010). *Introducción a Series de Tiempo*. Recuperado de <http://www.estadisticas.gobierno.pr/iepr/LinkClick.aspx?fileticket=4BxecUaZmg%3D>

Autores

Normeviz Depablo Vizcaya. Ingeniero Industrial, Universidad de Carabobo; Magister en Ingeniería Industrial, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7247-5693>

Email: normevizdepablo@gmail.com

Paola Martínez Valero. Ingeniero Industrial, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2734-9036>

Email: pao29mariana@gmail.com

Francisco José. Figueredo Lugo. Ingeniero Ingeniero Industrial. Profesor-Investigador, Departamento de Investigación de operaciones, Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7857-4971>

Email: ffigueredo@uc.edu.ve

Recibido: 30-03-2025

Aceptado: 29-06-2025

Evaluación de la eficiencia de equipos profesionales de fútbol mediante la combinación de AHP y DEA

Evaluation of the efficiency of professional football teams through the combination of AHP and DEA

Pedro Teppa-Garran, Ezequiel Fernández

Palabras clave: proceso analítico jerárquico, AHP, análisis envolvente de datos, DEA, eficiencia, fútbol

Key words: analytic hierarchy process, AHP, data envelopment analysis, DEA, efficiency, football

RESUMEN

Se propone un modelo de toma de decisiones multicriterio que combina los métodos AHP y DEA para evaluar la eficiencia de equipos profesionales de fútbol. Se empleó el Proceso Analítico Jerárquico —AHP, por sus siglas en inglés— para ponderar y agrupar las entradas y salidas del modelo (las entradas y salidas equivaldrían a los criterios en la nomenclatura AHP), y el Análisis Envolvente de Datos —DEA, por sus siglas en inglés— para medir la eficiencia de los equipos. Tres entradas (rendimiento ofensivo y defensivo, y salarios del equipo) se desglosan en siete subcriterios (goles marcados, tiros a portería, (goles marcados)/(% posesión del balón), tarjetas de penalización, índice de efectividad de tiro del oponente, salario de los jugadores, salario del cuerpo técnico) y dos salidas (éxito deportivo del equipo e ingresos) que se separan en seis subcriterios (puntos, campeonato de liga, campeonatos nacionales, derechos de transmisión, publicidad y comercialización, venta de entradas). Un grupo de expertos que incluye jugadores, entrenadores, analistas de datos, agentes de jugadores y cuerpo técnico, se conformó para ayudar a definir las entradas y salidas del modelo, así como su importancia relativa mediante el cálculo de pesos. La capa

AHP, mediante la ponderación y agrupación de las entradas y salidas, busca mejorar la medida de la eficiencia proporcionada por un modelo de optimización lineal DEA de rendimiento de escala constante, orientado a las salidas (CCR – O). El método detecta equipos ineficientes y permite analizar las causas de la ineficiencia en función de la valoración de sus entradas y salidas. El modelo híbrido AHP-DEA se aplicó a las ligas española e inglesa durante tres temporadas, mostrando cuándo los resultados deportivos se logran mediante el uso eficiente de los recursos disponibles de cada equipo.

ABSTRACT

A multi-criteria decision-making model combining AHP and DEA methods is proposed to evaluate the efficiency of professional football teams. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to weight and cluster the model's inputs and outputs (inputs and outputs are equivalent to the criteria in the AHP nomenclature), and Data Envelopment Analysis (DEA) was used to measure team efficiency. Three inputs (offensive and defensive performance, and team salaries) are broken down into seven sub-criteria (goals scored, shots on goal, (goals

scored)/(% ball possession), penalty cards, opponent's shot effectiveness rate, player salaries, coaching staff salaries), and two outputs (team sporting success and revenue) are broken down into six sub-criteria (points, league championship, national championships, broadcasting rights, advertising and merchandising, ticket sales). A group of experts, including players, coaches, data analysts, player agents, and technical staff, was assembled to help define the model's inputs and outputs, as well as their relative importance through the calculation of weights.

INTRODUCCIÓN

El negocio del deporte es un sector de indudable importancia social, cultural y económica. Numerosos atletas y equipos de élite se han convertido en auténticos iconos para millones de personas en todo el mundo. A la par de su importancia social, se suma la relevancia económica alcanzada por un sector que ha despertado el interés de grandes multinacionales al lanzar sus campañas publicitarias o firmar contratos televisivos multimillonarios para la retransmisión de eventos deportivos. De esta forma, la afluencia de aficionados a los estadios se ha convertido, en algunos casos, en una fuente de ingresos menor para los clubes y los atletas en general, en comparación con otros sectores que ahora generan el mayor porcentaje de los ingresos (Espitia-Escuer y García-Cebrián, 2010; Teppa-Garrán et al., 2023).

El fútbol ha sido protagonista de esta evolución deportiva, especialmente en Europa. La Unión Europea de Asociaciones de Fútbol (UEFA) es el organismo rector de

The AHP layer, by weighting and grouping inputs and outputs, seeks to improve the efficiency measure provided by a constant-scale return, output-oriented (CCR-O) linear optimization model. The method detects inefficient teams and allows for the analysis of the causes of inefficiency based on the valuation of their inputs and outputs. The hybrid AHP-DEA model was applied to the Spanish and English leagues for three seasons, showing when sporting results are achieved through the efficient use of each team's available resources.

este deporte en Europa y supervisa las competiciones y federaciones de todo el continente. Uno de sus mecanismos de evaluación es el coeficiente UEFA, que mide la competitividad de las ligas europeas según los resultados de los equipos en torneos como la Champions League, la Europa League y la Conference League (UEFA, n.d.). Según este coeficiente, las cinco mejores ligas de la temporada 2023/2024 fueron la Premier League (Inglaterra), La Liga (España), la Serie A (Italia), la Bundesliga (Alemania) y la Ligue 1 (Francia). La clasificación anterior coincide con el ofrecido por la consultora Opta a través del Opta Power Ranking para el mismo período (Opta, n.d.). Un factor crucial en estas clasificaciones es el valor de mercado de cada liga. Según el conocido sitio web alemán Transfermarkt, en 2024, la Premier League superó ampliamente el primer puesto con un valor de 11.740 millones de euros, mientras que La Liga alcanzó los

5.470 millones de euros. Le siguieron, en orden, la Serie A (4.950 millones), la Bundesliga (4.490 millones) y la Ligue 1 (3.580 millones). Además del aspecto económico, también destaca el impacto social de la enorme popularidad de estas ligas a nivel mundial, siendo las más seguidas y mediáticas del mundo del fútbol.

Por otro lado, ha aumentado el interés en el análisis del rendimiento económico y deportivo del deporte profesional. La proliferación de estos estudios empíricos se explica desde tres perspectivas: la primera es el enorme impacto emocional asociado a esta actividad; la segunda, la importancia financiera y las peculiaridades económicas de esta industria; y la tercera, la disponibilidad de datos estadísticos precisos.

El método AHP es una herramienta matemática desarrollada por Thomas Saaty en la década de 1980 para obtener la mejor decisión a partir de una serie de valores fácilmente medibles por los usuarios (Saaty, 1980, 1990, 2008). Su flexibilidad y simplicidad matemática lo han convertido en una herramienta ampliamente utilizada para la toma de decisiones en diversos ámbitos, como la industria alimentaria, los negocios, la ecología, la salud, el medio ambiente y la administración pública (Vaidya y Kumar, 2006; Liberatore y Nydick, 2008; Panchal y Shrivastava, 2022; Veisi et al., 2022). También se ha aplicado con éxito en diferentes deportes (Nisel y Özdemir, 2016), de manera particular en el béisbol (Teppa-Garran y Fernandez-Da

Costa, 2023, 2024) y para evaluar la industria del deporte (Yong, 2021).

El método DEA fue desarrollado inicialmente por Charnes, Cooper y Rhodes (1978) utilizando un modelo CRS (retorno de escala constante). Esto fue seguido por Banker, Charnes y Cooper (1984) con un modelo VRS (retorno de escala variable). DEA tiene como objetivo comparar unidades de toma de decisiones operativas (DMU, por sus siglas en inglés) similares. Se supone que estas DMU consumen insumos y generan productos. DEA permite determinar si el nivel observado de productos podría haberse logrado con un nivel menor de insumos o si se podría haber producido una cantidad más significativa de productos con el consumo de los insumos observado. El enfoque típico vincula los insumos con los suministros o recursos (entradas) y los productos con los resultados (salidas). La eficiencia en DEA es la relación entre la suma ponderada de las salidas y la suma ponderada de las entradas de una DMU. En deportes, una DMU puede ser un jugador, un entrenador, una federación deportiva, un equipo deportivo o un juego. Además de suministrar la eficiencia de una DMU, la utilidad de DEA también reside en proporcionar información sobre una DMU ineficiente mediante la determinación del valor de las entradas y salidas. DEA se ha utilizado ampliamente en múltiples aplicaciones relacionadas con el deporte, como lo han revisado exhaustivamente Bhat et al. (2019). El fútbol también se ha evaluado utilizando DEA en repetidas ocasiones. Por ejemplo, Dawson et al.

(2000a) estimaron la eficiencia de entrenadores y, en (2000b), la eficiencia de la gestión empresarial de los equipos de fútbol ingleses. Sin embargo, Haas et al. (2004) realizaron el primer estudio utilizando DEA para medir la eficiencia de los equipos de fútbol considerando la Bundesliga alemana en la temporada 1999/2000. Desde entonces, muchos otros estudios han abordado esta cuestión desde diferentes perspectivas y ligas de fútbol. Por ejemplo, Espitia-Escuer y García-Cebrián (2004, 2006, 2008) y García-Sánchez (2007) estudiaron equipos de fútbol españoles. Calôba y Lins (2006) y Roboredo et al. (2015) analizaron equipos de fútbol brasileños. Boscá et al. (2009) consideraron el aumento de la eficiencia ofensiva y defensiva del fútbol italiano y español. Lee (2009) evaluó la eficiencia de la liga coreana y Dávila y Cebrián (2012) la de la liga mexicana. Finalmente, Xu (2018) analizó la eficiencia de los equipos de fútbol de la liga china. Estos estudios, emplean un marco conceptual similar, ya que consideran las variaciones en los modelos de optimización DEA y la selección de entradas y salidas. Las entradas y salidas pueden clasificarse en tres categorías: económicas (costos operativos, nómina del equipo, gastos, salario del entrenador, etc.), sociales (instalaciones del estadio, aforo del estadio, número de espectadores por partido, etc.) y deportivas (puntos, goles marcados, posesión, pases, número de jugadores, etc.) (Villa y Lozano, 2019).

La contribución de este trabajo consiste en proponer un modelo de toma de decisiones

multicriterio para evaluar la eficiencia de los equipos de fútbol mediante la combinación de los métodos AHP y DEA. El primero tiene por objeto ponderar la importancia de las entradas y salidas del modelo DEA, y el segundo es medir la eficiencia de los equipos. El propósito es mejorar la medida de eficiencia proporcionada por DEA, descomponiendo sus entradas y salidas en factores económicos y deportivos cuya importancia relativa se calcula utilizando AHP. Otra ventaja de la incorporación de AHP es que permite mediante la agrupación de subcriterios reducir el número efectivo de entradas y salidas del modelo DEA y de esta manera lograr que la relación entre cantidad de DMUs con respecto al número de entradas y salidas aumente, lo que conlleva a que la medida de eficiencia de DEA mejore (Thanassoulis, 2001). En otras palabras, se desarrolla un instrumento híbrido AHP - DEA, donde AHP, ayuda con sus ponderaciones y la posibilidad de agrupar los subcriterios para formar entradas y salidas, a aumentar la capacidad de discriminación de DEA y, por lo tanto, proporciona una mejor medida de la eficiencia de los equipos de fútbol a nivel profesional. El modelo AHP-DEA propuesto tiene tres entradas y dos salidas. Entre las entradas se encuentran dos deportivas, rendimiento ofensivo y defensivo, y una económica, los salarios del equipo. Para las salidas, hay una deportiva, el éxito deportivo del equipo, y una económica, los ingresos del equipo. Estas entradas y salidas se descomponen en un total de trece subcriterios. Se utilizó un

modelo de optimización DEA del tipo CCR-O para medir la eficiencia. El método AHP-DEA propuesto se aplicó a la Premier League y La Liga en las temporadas 2020/2021, 2021/2022 y 2022/2023.

Los resultados de este trabajo promueven la innovación en el deporte mediante el análisis avanzado de datos para evaluar la eficiencia de los equipos de fútbol y mejorar la gestión y las decisiones, contribuyendo así al Objetivo de Desarrollo Sostenible 9 de las Naciones Unidas.

Aspectos básicos de AHP

AHP consta de tres pasos: (i) Estructura jerárquica: En el primer nivel, aparece el objetivo de decisión y, en los niveles siguientes, la descomposición progresiva en criterios, y subcriterios para lograr el objetivo de decisión. (ii) Comparaciones por pares: En cada nivel de la jerarquía, utilizando una escala de nueve puntos, como se muestra en la Tabla 1 (Saaty, 1980), se pide a los expertos del dominio de la aplicación que se está tratando, que efectúen comparaciones por pares de los elementos.

Tabla 1. Escala numérica fundamental de Saaty

1	Igual importancia
2	Importancia débil
3	Importancia moderada
4	Importancia algo más que moderada
5	Fuerte importancia
6	Importancia algo más que fuerte
7	Importancia muy fuerte
8	Importancia muy, muy fuerte
9	Extrema importancia

Las comparaciones se realizan entre la importancia relativa de cada dos criterios, para cada subcriterio bajo el mismo criterio, y así sucesivamente. (iii) Verificación de consistencia: Para lograr el objetivo de decisión, los juicios del experto deben determinar la importancia relativa de cada criterio. La consistencia no se garantiza automáticamente porque AHP permite a los expertos realizar juicios subjetivos. Se debe calcular la razón de consistencia para controlar la consistencia de las comparaciones por pares. Los expertos deben revisar sus juicios si la razón de consistencia excede el umbral establecido de 0,1 (Saaty, 2000).

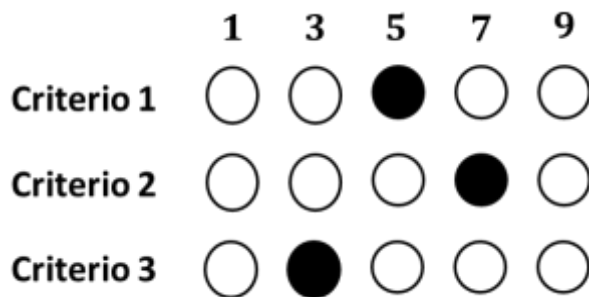
Una vez realizadas todas las comparaciones y revisiones por pares necesarias, y una vez determinado que la razón de consistencia es inferior a 0,1, se pueden sintetizar los juicios para priorizar los criterios de decisión y sus respectivos subcriterios. Se puede encontrar una descripción detallada de la implementación de los pasos del AHP en (Teppa-Garran y Fernandez-Da Costa, 2023, 2024).

Cómputo de las matrices de comparación pareada en AHP

Este trabajo propone un procedimiento para calcular las matrices de comparación por pares diferente del sugerido por Saaty (1980). Su empleo ha mostrado que tiene la ventaja de reducir significativamente el número de preguntas realizadas a cada experto y producir matrices de comparación por pares con razones de consistencia muy bajas. Se pide a cada

experto que califique cada factor (criterio, subcriterio) utilizando la escala numérica $\{1, 3, 5, 7, 9\}$, donde *uno* significa que el factor evaluado tiene la menor importancia; y *nueve*, la mayor. Los números restantes representan niveles intermedios de importancia. Por ejemplo, si se evalúan tres criterios y un experto atribuye importancia relativa a cada criterio de $\{C_1, C_2, C_3\} = \{5, 7, 3\}$ (ver Figura 1). Para realizar las comparaciones y construir la matriz, las puntuaciones iniciales dadas ya no son relevantes, lo esencial pasa a ser la separación entre los criterios. Por ejemplo, la relación entre C_2 y los criterios C_1 y C_3 son $C_2/C_1 = 3/1$ y $C_2/C_3 = 5/1$. Igualmente, se tiene $C_1/C_3 = 3/1$.

Figura 1. Puntuación dada por un experto a cada criterio



Para el ejemplo, la matriz de comparación pareada resulta en la matriz presentada en la figura 2.

Figura 2. Matriz de comparación pareada

	C_1	C_2	C_3
C_1	1	1/3	3
C_2	3	1	5
C_3	1/3	1/5	1

Aspectos básicos de DEA

DEA tiene cuatro orientaciones; hacia las entradas (insumos) o salidas (productos) y hacia los rendimientos de escala, constantes (CRS) (Charnes et al., 1978) o variables (VRS) (Banker et al., 1984). El modelo orientado a entradas, o de minimización de entradas, investiga el nivel en el que se pueden reducir los insumos para un nivel de producto constante. Por otro lado, el modelo orientado a salidas, o de maximización de salidas, examina el grado en el que se pueden aumentar los productos para niveles de insumos constantes (Coelli et al., 2005). CRS indica un aumento simétrico en los productos cuando se aumentan los insumos. Por el contrario, VRS muestra un aumento o disminución no proporcional en los productos cuando se aumentan los insumos (Avkiran, 1999). El uso de CRS orientado a insumos produce un modelo de optimización CCR-I; en el caso de estar orientado a productos, un modelo de optimización CCR-O. El caso VRS da como resultado los modelos de optimización BCC-I y BCC-O dependiendo de la orientación hacia la entrada o la salida, respectivamente. Supongamos que se evalúan n DMUs, cada una consumiendo diferentes cantidades de las m entradas para producir las s salidas. La DMU j consume la cantidad x_{ij} de la entrada i y produce la cantidad y_{rj} de la salida r . Considerando la DMU o , con $o \in \{1, 2, \dots, n\}$ como la DMU en evaluación, el siguiente modelo de optimización contiene los modelos de análisis envolvente de datos CCR y BCC orientados a entradas. Esto es,

CCR-I y BCC-I, según se utilice la ecuación (5) o la (6).

$$\text{Minimizar } z_o = z \quad (1)$$

Sujeto a

$$zx_{io} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{ro}, \quad r = 1, \dots, s \quad (3)$$

$$\lambda \in \{\Delta^{CCR} \text{ or } \Delta^{BCC}\} \quad (4)$$

donde

$$\Delta^{CCR} = \{\lambda: \lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n\} \quad (5)$$

y

$$\Delta^{BCC} = \left\{ \lambda: \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n \right\} \quad (6)$$

Ambos modelos miden la eficiencia z_o de la DMUo, minimizando (1) como la contracción radial de las entradas (2) que se puede lograr, garantizando al mismo tiempo la obtención de un nivel mínimo de

salidas (3). Para lograrlo, se construye una DMU virtual como una combinación lineal de todas las DMUs, construidas utilizando las variables λ_j . Se dice que una DMU es eficiente si, al resolver (1) - (4) con (5) o (6), el valor óptimo de la eficiencia z_o es 1. Los modelos CCR y BCC orientados a la salida se obtienen resolviendo el siguiente problema de optimización lineal.

$$\text{Maximizar } \eta_o = \eta \quad (7)$$

Sujeto a

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq x_{io}, \quad i = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$\eta y_{ro} - \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \leq 0, \quad r = 1, \dots, s \quad (9)$$

$$\lambda \in \{\Delta^{CCR} \text{ or } \Delta^{BCC}\} \quad (10)$$

Los modelos CCR-O y BCC-O buscan maximizar la salida (9) obtenida para un nivel máximo de consumo de insumos (8). La eficiencia de la DMUo (7) se calcula como se indica en la ecuación (11).

$$z_o = 1/\eta_o \quad (11)$$

MÉTODO AHP – DEA

Formulación de las entradas y salidas del modelo DEA

Para este estudio, las DMU corresponden a equipos de fútbol de la Premier League y La Liga. La Figura 2 muestra la selección de

entradas y salidas y su descomposición en diversos atributos. Las explicaciones del significado de las entradas y salidas se presentan en las Tablas 2 y 3, respectivamente.

Figura 2. Modelo DEA entrada – salida

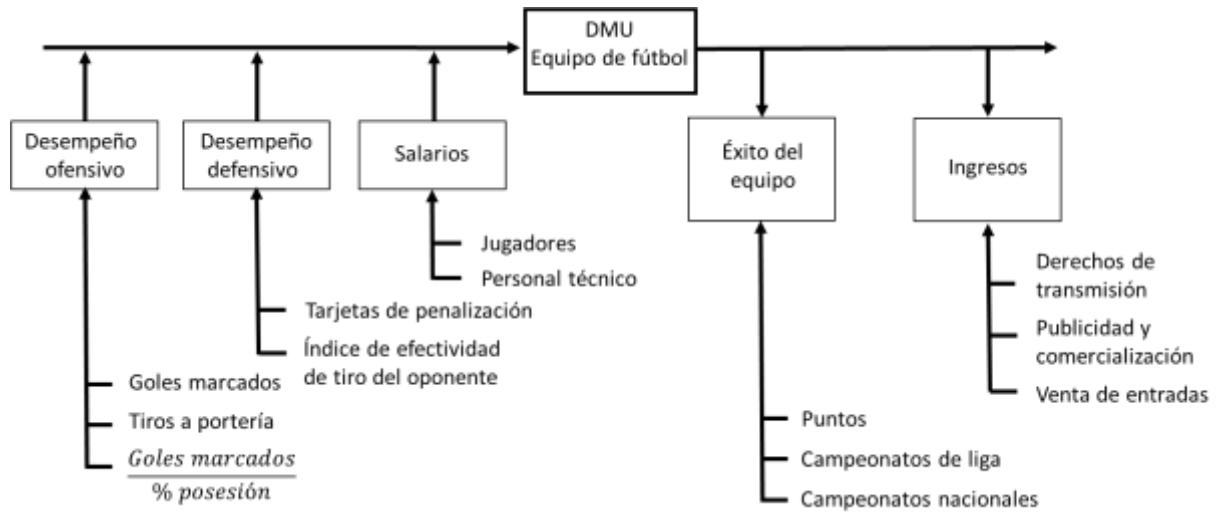


Tabla 2. Descripción de las entradas del modelo DEA

ENTRADAS		
Desempeño ofensivo	Goles marcados	Se marca un gol cuando la totalidad del balón pasa por encima de la línea de gol, entre los postes y por debajo del travesaño, siempre que el equipo que marca el gol no haya cometido ninguna infracción.
	Tiros a portería	Un disparo que entra en la portería o habría entrado en la portería si el portero u otro jugador defensivo no lo hubieran bloqueado.
	$\frac{\text{Goles marcados}}{\% \text{ Posesión}}$	Los goles marcados ya están definidos. La posesión es el tiempo que un equipo controla el balón durante un partido.
Desempeño defensivo	Tarjetas de penalización	Los árbitros las utilizan para indicar que un jugador ha cometido una infracción. Una tarjeta amarilla es una medida disciplinaria. Indica que un jugador ha sido amonestado por una infracción. Los jugadores que reciben una tarjeta roja son expulsados del terreno de juego y no pueden competir en el resto del partido. Una vez expulsado, el entrenador del equipo infractor no puede sustituirlo por otro jugador.
	Índice de efectividad de tiro del oponente	Este índice se calcula dividiendo los goles marcados por el equipo rival entre los tiros a portería.
	Jugadores	Es el salario total que reciben todos los jugadores del equipo durante una temporada.
Salarios	Personal técnico	Es el salario total que recibe el cuerpo técnico durante una temporada. Los miembros del cuerpo técnico varían según el equipo. Entre ellos se encuentran, por ejemplo, el entrenador, el preparador físico, el fisioterapeuta, el director de personal y operaciones del equipo, el analista del equipo y el coordinador de los reclutadores.

Tabla 3. Descripción de las salidas del modelo DEA

SALIDAS		
Éxito deportivo del equipo	Puntos	Se otorgan tres puntos al equipo ganador del partido, y ninguno al perdedor. En caso de empate, cada equipo recibe un punto.
	Campeonatos de liga	Es el equipo que ganó el título de la Premier League en Inglaterra o La Liga en España.
	Campeonatos nacionales	En Inglaterra se juegan tres Copas Nacionales por temporada: la FA Cup, la Community Shield y la EFL Cup. En España, hay dos: la Copa del Rey y la Supercopa de España.
	Derechos de transmisión	Las ligas y competiciones suelen vender derechos de transmisión a canales de televisión por cantidades considerables. Estos acuerdos permiten a los canales transmitir en directo partidos, resúmenes y eventos relacionados. A cambio, los clubes reciben una parte de los ingresos.
Ingresos	Publicidad y comercialización	Estos son los ingresos recibidos durante una temporada por conceptos de marketing y publicidad.
	Venta de entradas	Corresponde a los ingresos obtenidos por la venta de entradas al estadio durante una temporada.

Ponderación de las entradas y salidas empleando AHP

Las figuras 3 y 4 muestran el modelo jerárquico de las entradas y salidas, respectivamente, para el modelo DEA de la figura 2. Se formó un equipo de ocho expertos con amplia experiencia en el ámbito futbolístico para ayudar en la definición de las entradas y salidas, así como para calcular los diferentes pesos de los modelos. Las características relevantes de los expertos se muestran en la tabla 4.

Una vez diseñada la estructura jerárquica, se calcularon los pesos. Solo el primer experto y el modelo de entrada de la Fig. 3 se utilizarán como ejemplo ilustrativo para explicar el procedimiento. Se realizaron encuestas a los ocho expertos para determinar los pesos del nivel de criterio. La Tabla 5 muestra la matriz de comparación por pares, la normalización de columnas (los elementos de cada

columna suman uno), el vector de prioridad (media aritmética de cada fila de la matriz normalizada) y la razón de consistencia para el experto. Al repetir este procedimiento con los expertos restantes, se obtienen los vectores de prioridad de la Tabla 6. Al tomar la media geométrica de los ocho vectores de prioridad y normalizar de modo que la suma de los elementos sea uno, se obtienen los pesos calculados en el nivel de criterio del modelo de entrada $[0.43 \ 0.29 \ 0.28]^T$. Se procede de forma análoga para determinar los pesos de los tres subcriterios (goles marcados, tiros a portería, Goles/% Posesión) asociados al criterio de desempeño ofensivo (DO). El vector de prioridad general para este nivel se calcula como $[0.47 \ 0.23 \ 0.30]^T$. Multiplicando este vector por el peso del criterio DO (0,43) se obtiene $[0.20 \ 0.10 \ 0.13]^T$. Estos pesos indican cómo se distribuye la importancia relativa

de 43 % para el criterio DO dentro de los tres subcriterios. Los pesos restantes de los modelos de entrada y salida se podrían

obtener sin dificultad repitiendo este procedimiento.

Figura 3. Modelo jerárquico de las entradas

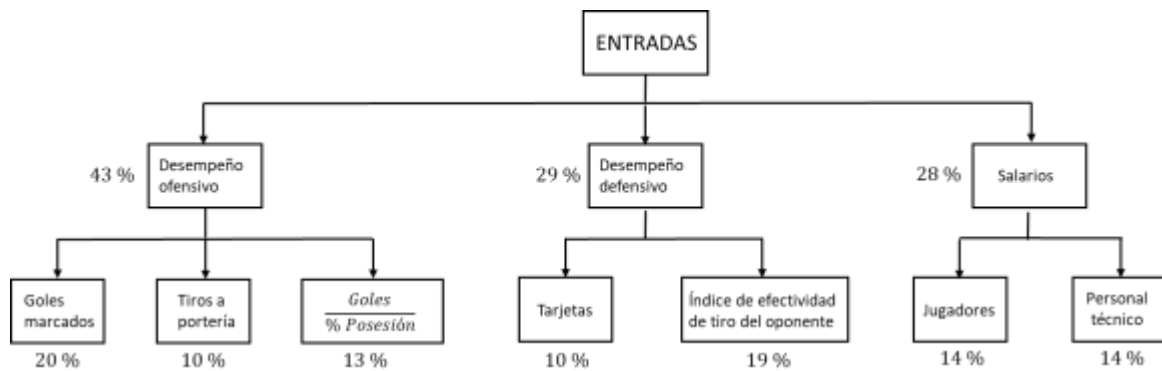


Figura 4. Modelo jerárquico de las salidas

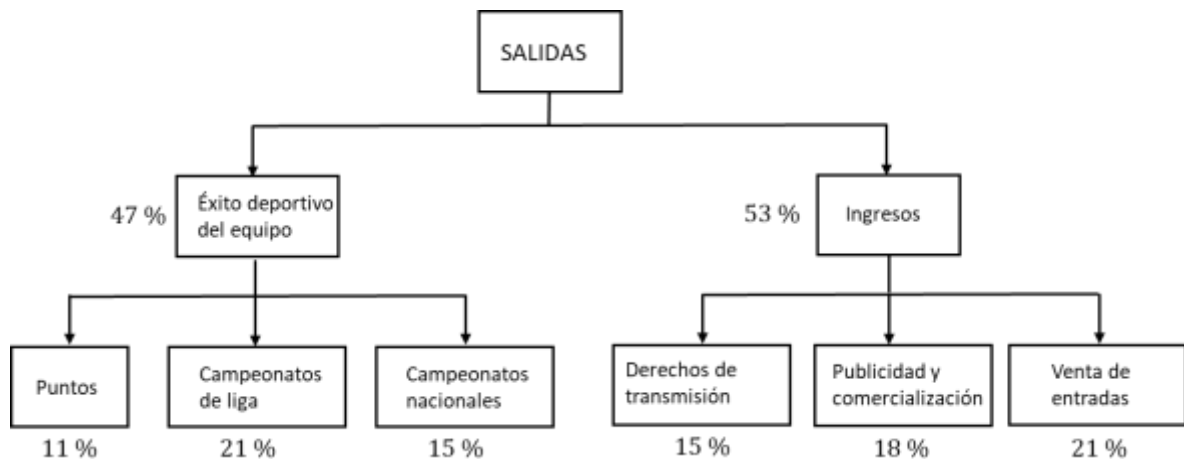


Tabla 4. Descripción del equipo de expertos

Experto	Área de experticia dentro del ámbito futbolístico	País de residencia
1	Director técnico de equipos de fútbol, analista de datos y agente de jugadores	España
2	Miembro del cuerpo técnico de equipos de fútbol	España
3	Jugador de fútbol profesional	Venezuela
4	Miembro del cuerpo técnico de equipos de fútbol y exfutbolista profesional.	Venezuela
5	Jugador de fútbol profesional	Venezuela
6	Administrador de redes sociales con fines deportivos	Estados Unidos
7	Jugador de fútbol profesional	Venezuela
8	Jugador de fútbol profesional	Estados Unidos

Tabla 5. Resultados para el Experto 1

Matriz de comparación pareada			Matriz normalizada			Vector de pesos	Razón de consistencia
1	1	3	0.43	0.43	0.43	0.43	0 %
1	1	3	0.43	0.43	0.43	0.43	
0.33	0.33	1	0.14	0.14	0.14	0.14	

Tabla 6. Vectores de pesos de los ocho expertos y el vector de pesos global resultante para el criterio DO del modelo de entrada

Experto 1	Experto 2	Experto 3	Experto 4	Experto 5	Experto 6	Experto 7	Experto 8	Vector de pesos global
0.43	0.60	0.60	0.45	0.20	0.20	0.33	0.64	0.43
0.43	0.20	0.20	0.45	0.20	0.20	0.33	0.28	0.29
0.14	0.20	0.20	0.10	0.60	0.60	0.33	0.07	0.28

Adquisición de datos

Como ejemplo de adquisición de datos, se considera la temporada 2021/2022 de la Premier League. La Tabla 7 muestra las variables deportivas del modelo de entrada y la Tabla 8, las del modelo de salida. Toda la información deportiva se obtuvo del sitio web de FBref (FBref, n.d.), la información

sobre las variables económicas del modelo de entrada se puede consultar en la Tabla 9 y la del modelo de salida en la Tabla 10. La información económica se obtuvo de los informes financieros de los equipos, excepto los salarios de los jugadores, que se consultaron tanto en los informes financieros como en el sitio web de FBref.

Tabla 7. Variables deportivas del modelo de entrada para la temporada 2021/2022 de la Premier League

Equipos	Goles	Tiros	G/P %	Tarjetas	IETO
Manchester City	96	237	141	43	0,110
Liverpool	94	237	150	51	0,084
Chelsea	75	200	121	64	0,096
Tottenham	63	185	122	70	0,080
Arsenal	60	186	114	71	0,112
Manchester Utd	56	179	106	79	0,107
West Ham	58	142	121	55	0,090
Leicester City	62	164	119	56	0,104
Brighton	40	141	74	74	0,093
Wolves	35	133	71	64	0,084
Newcastle Utd	41	142	101	83	0,115
Crystal Palace	50	140	98	70	0,100
Brentford	46	141	103	68	0,108
Aston Villa	50	159	108	83	0,110
Southampton	41	161	86	67	0,132
Everton	42	130	105	88	0,117
Leeds United	42	142	80	104	0,135
Burnley	32	119	80	70	0,085
Watford	33	123	81	66	0,134
Norwich City	21	104	49	58	0,132

Tabla 8. Variables deportivas del modelo de salida para la temporada 2021/2022 de la Premier League

Equipos	Puntos	Campeonatos de liga	Campeonatos nacionales		
			FA	CS	EFL
Manchester City	93	1	0	0	0
Liverpool	92	0	1	0	1
Chelsea	74	0	0	0	0
Tottenham	71	0	0	0	0
Arsenal	69	0	0	0	0
Manchester Utd	58	0	0	0	0
West Ham	56	0	0	0	0
Leicester City	52	0	0	1	0
Brighton	51	0	0	0	0
Wolves	51	0	0	0	0
Newcastle Utd	49	0	0	0	0
Crystal Palace	48	0	0	0	0
Brentford	46	0	0	0	0
Aston Villa	45	0	0	0	0
Southampton	40	0	0	0	0
Everton	39	0	0	0	0
Leeds United	38	0	0	0	0
Burnley	35	0	0	0	0
Watford	23	0	0	0	0
Norwich City	22	0	0	0	0

Tabla 9. Variables económicas del modelo de entrada para la temporada 2021/2022 de la Premier League

Equipos	Salarios jugadores (€)	Salarios personal técnico (€)
Manchester City	180.735.566,00	182.914.451,50
Liverpool	172.220.653,00	208.926.505,70
Chelsea	209.760.207,00	191.029.413,00
Tottenham	131.408.702,00	115.049.818,00
Arsenal	136.393.624,00	113.717.006,00
Manchester Utd	284.844.078,00	113.946.306,30
West Ham	88.912.857,00	70.965.915,90
Leicester City	88.691.036,00	125.723.164,00
Brighton	55.418.481,00	80.416.449,00
Wolves	68.298.179,00	73.780.681,00
Newcastle Utd	81.774.162,00	118.738.458,00
Crystal Palace	86.997.594,00	58.851.186,00
Brentford	25.198.890,00	55.147.530,00
Aston Villa	85.256.450,00	76.143.250,00
Southampton	62.705.051,00	70.891.489,00
Everton	110.548.361,00	80.303.839,00
Leeds United	28.394.966,00	114.626.374,00
Burnley	47.130.158,00	61.255.042,00
Watford	49.348.326,00	43.721.574,00
Norwich City	37.351.130,00	101.664.670,00

Tabla 10. Variables económicas del modelo de salida para la temporada 2021/2022 de la Premier League

Equipos	Derechos de transmisión (€)	Publicidad y comercialización (€)	Venta de entradas (€)
Manchester City	180.356.382,22	364.588.963,20	64.185.244,20
Liverpool	178.919.790,59	290.637.270,00	102.259.080,00
Chelsea	171.561.081,11	208.641.510,00	81.524.520,00
Tottenham	172.098.529,15	216.181.350,00	124.996.410,00
Arsenal	171.648.957,94	166.936.770,00	93.541.140,00
Manchester Utd	168.238.327,81	303.737.742,00	130.220.105,40
West Ham	160.879.618,33	56.313.180,00	48.655.530,00
Leicester City	151.546.868,00	49.715.820,00	24.740.100,00
Brighton	148.136.237,87	28.981.260,00	28.981.260,00
Wolves	146.699.646,23	32.515.560,00	15.668.730,00
Newcastle Utd	149.211.135,13	31.219.650,00	32.397.750,00
Crystal Palace	141.852.424,47	23.915.430,00	13.548.150,00
Brentford	139.428.813,59	18.378.360,00	12.252.240,00
Aston Villa	140.953.282,05	35.107.380,00	18.967.410,00
Southampton	130.633.512,47	21.323.610,00	20.498.940,00
Everton	138.080.099,97	59.376.240,00	18.378.360,00
Leeds United	135.656.489,08	57.726.900,00	28.981.260,00
Burnley	123.362.679,83	13.548.150,00	8.246.700,00
Watford	120.939.068,94	41.940.360,00	8.011.080,00
Norwich City	118.515.458,06	24.975.720,00	12.723.480,00

Procesamiento de datos

Dado que las variables de rendimiento defensivo (Tarjetas de penalización e Índice de Efectividad de Tiro del Oponente) son inversas (un mejor resultado corresponde a un número menor), deben transformarse en un equivalente directo para su uso dentro del método AHP. Para ello, se aplica la transformación uno dividido por el valor actual; los resultados se muestran en la Tabla 11. La siguiente etapa de procesamiento de datos normaliza los datos de entrada y salida a valores entre 0 y 1. La razón de la normalización es hacer los datos más influenciados por el valor de los pesos obtenidos con AHP. La Tabla 12 muestra las variables de entrada y la Tabla

13 las variables de salida. El procesamiento final consiste en generar entradas y salidas ponderadas. Para ello, cada entrada normalizada en la Tabla 12 se multiplicará por el peso correspondiente del modelo de entrada en la Figura 3. De forma similar, cada salida normalizada en la Tabla 13 se multiplicará por su respectivo peso en el modelo de salida en la Figura 4. Así, por ejemplo, los goles de entrada normalizados marcados por el equipo de Liverpool 0.091 se multiplican por el peso 0.2, dando como resultado 0.0182. Los resultados de todas estas operaciones para las entradas y salidas se muestran en las Tablas 14 y 15, respectivamente.

Tabla 11. Variables deportivas inversas del modelo de entrada son transformadas en directas para la temporada 2021/2022 de la Premier League

Equipos	Tarjetas	IETO
Manchester City	0,023	9,077
Liverpool	0,020	11,880
Chelsea	0,016	10,469
Tottenham	0,014	12,564
Arsenal	0,014	8,915
Manchester Utd	0,013	9,370
West Ham	0,018	11,061
Leicester City	0,018	9,586
Brighton	0,014	10,727
Wolves	0,016	11,881
Newcastle Utd	0,012	8,733
Crystal Palace	0,014	9,977
Brentford	0,015	9,222
Aston Villa	0,012	9,058
Southampton	0,015	7,585
Everton	0,011	8,525
Leeds United	0,010	7,385
Burnley	0,014	11,725
Watford	0,015	7,486
Norwich City	0,017	7,549

Tabla 12. Variables de entrada normalizadas para la temporada 2021/2022 de la Premier League

Equipos	Goles	Tiros	G/P %	Tarjetas	IETO	Salario jugadores	Salario personal técnico
Manchester City	0,093	0,075	0,070	0,077	0,047	0,089	0,089
Liverpool	0,091	0,075	0,074	0,065	0,062	0,085	0,102
Chelsea	0,072	0,063	0,060	0,052	0,054	0,103	0,093
Tottenham	0,061	0,058	0,060	0,048	0,065	0,065	0,056
Arsenal	0,058	0,059	0,056	0,047	0,046	0,067	0,055
Manchester Utd	0,054	0,057	0,052	0,042	0,049	0,140	0,055
West Ham	0,056	0,045	0,060	0,061	0,057	0,044	0,034
Leicester City	0,060	0,052	0,059	0,059	0,050	0,044	0,061
Brighton	0,039	0,045	0,036	0,045	0,056	0,027	0,039
Wolves	0,034	0,042	0,035	0,052	0,062	0,034	0,036
Newcastle Utd	0,040	0,045	0,050	0,040	0,045	0,040	0,058
Crystal Palace	0,048	0,044	0,048	0,048	0,052	0,043	0,029
Brentford	0,044	0,045	0,051	0,049	0,048	0,012	0,027
Aston Villa	0,048	0,050	0,053	0,040	0,047	0,042	0,037
Southampton	0,040	0,051	0,042	0,050	0,039	0,031	0,034
Everton	0,041	0,041	0,052	0,038	0,044	0,054	0,039
Leeds United	0,041	0,045	0,040	0,032	0,038	0,014	0,056
Burnley	0,031	0,038	0,039	0,048	0,061	0,023	0,030
Watford	0,032	0,039	0,040	0,050	0,039	0,024	0,021
Norwich City	0,020	0,033	0,024	0,057	0,039	0,018	0,049

Tabla 13. Variables de salida normalizadas para la temporada 2021/2022 de la Premier League

Equipos	Puntos	Camp . Liga	Camp. Nac.	Derechos transmisión	Pub. y Comerc.	Entradas
Manchester City	0,088	1,00	0,00	0,060	0,178	0,072
Liverpool	0,087	0,00	0,67	0,060	0,142	0,115
Chelsea	0,070	0,00	0,00	0,057	0,102	0,092
Tottenham	0,067	0,00	0,00	0,058	0,106	0,141
Arsenal	0,066	0,00	0,00	0,057	0,082	0,105
Manchester Utd	0,055	0,00	0,00	0,056	0,148	0,147
West Ham	0,053	0,00	0,00	0,054	0,028	0,055
Leicester City	0,049	0,00	0,33	0,051	0,024	0,028
Brighton	0,048	0,00	0,00	0,050	0,014	0,033
Wolves	0,048	0,00	0,00	0,049	0,016	0,018
Newcastle Utd	0,047	0,00	0,00	0,050	0,015	0,036
Crystal Palace	0,046	0,00	0,00	0,047	0,012	0,015
Brentford	0,044	0,00	0,00	0,047	0,009	0,014
Aston Villa	0,043	0,00	0,00	0,047	0,017	0,021
Southampton	0,038	0,00	0,00	0,044	0,010	0,023
Everton	0,037	0,00	0,00	0,046	0,029	0,021
Leeds United	0,036	0,00	0,00	0,045	0,028	0,033
Burnley	0,033	0,00	0,00	0,041	0,007	0,009
Watford	0,022	0,00	0,00	0,040	0,021	0,009
Norwich City	0,021	0,00	0,00	0,040	0,012	0,014

Tabla 14. Variables de entrada ponderadas para la temporada 2021/2022 de la Premier League

Equipos	Goles	Tiros	G/P %	Tarj.	IETO	Salario jugadores	Salario personal técnico
Manchester City	0,0186	0,0075	0,0091	0,0077	0,0089	0,0125	0,0125
Liverpool	0,0182	0,0075	0,0096	0,0065	0,0118	0,0119	0,0143
Chelsea	0,0144	0,0063	0,0078	0,0052	0,0103	0,0144	0,0130
Tottenham	0,0122	0,0058	0,0078	0,0048	0,0124	0,0091	0,0078
Arsenal	0,0116	0,0059	0,0073	0,0047	0,0087	0,0094	0,0077
Manchester Utd	0,0108	0,0057	0,0068	0,0042	0,0093	0,0196	0,0077
West Ham	0,0112	0,0045	0,0078	0,0061	0,0108	0,0062	0,0048
Leicester City	0,0120	0,0052	0,0077	0,0059	0,0095	0,0062	0,0085
Brighton	0,0078	0,0045	0,0047	0,0045	0,0106	0,0038	0,0055
Wolves	0,0068	0,0042	0,0046	0,0052	0,0118	0,0048	0,0050
Newcastle Utd	0,0080	0,0045	0,0065	0,0040	0,0086	0,0056	0,0081
Crystal Palace	0,0096	0,0044	0,0062	0,0048	0,0099	0,0060	0,0041
Brentford	0,0088	0,0045	0,0066	0,0049	0,0091	0,0017	0,0038
Aston Villa	0,0096	0,0050	0,0069	0,0040	0,0089	0,0059	0,0052
Southampton	0,0080	0,0051	0,0055	0,0050	0,0074	0,0043	0,0048
Everton	0,0082	0,0041	0,0068	0,0038	0,0084	0,0076	0,0055
Leeds United	0,0082	0,0045	0,0052	0,0032	0,0072	0,0020	0,0078
Burnley	0,0062	0,0038	0,0051	0,0048	0,0116	0,0032	0,0042
Watford	0,0064	0,0039	0,0052	0,0050	0,0074	0,0034	0,0029
Norwich City	0,0040	0,0033	0,0031	0,0057	0,0074	0,0025	0,0069

Tabla 15. Variables de salida ponderadas para la temporada 2021/2022 de la Premier League

Equipos	Puntos	Camp. Liga	Camp. Nac.	Derechos transmisión	Pub. y comerc.	Entradas
Manchester City	0,0097	0,2100	0,0000	0,0090	0,0320	0,0151
Liverpool	0,0096	0,0000	0,1005	0,0090	0,0256	0,0242
Chelsea	0,0077	0,0000	0,0000	0,0086	0,0184	0,0193
Tottenham	0,0074	0,0000	0,0000	0,0087	0,0191	0,0296
Arsenal	0,0073	0,0000	0,0000	0,0086	0,0148	0,0221
Manchester Utd	0,0061	0,0000	0,0000	0,0084	0,0266	0,0309
West Ham	0,0058	0,0000	0,0000	0,0081	0,0050	0,0116
Leicester City	0,0054	0,0000	0,0495	0,0077	0,0043	0,0059
Brighton	0,0053	0,0000	0,0000	0,0075	0,0025	0,0069
Wolves	0,0053	0,0000	0,0000	0,0074	0,0029	0,0038
Newcastle Utd	0,0052	0,0000	0,0000	0,0075	0,0027	0,0076
Crystal Palace	0,0051	0,0000	0,0000	0,0071	0,0022	0,0032
Brentford	0,0048	0,0000	0,0000	0,0071	0,0016	0,0029
Aston Villa	0,0047	0,0000	0,0000	0,0071	0,0031	0,0044
Southampton	0,0042	0,0000	0,0000	0,0066	0,0018	0,0048
Everton	0,0041	0,0000	0,0000	0,0069	0,0052	0,0044
Leeds United	0,0040	0,0000	0,0000	0,0068	0,0050	0,0069
Burnley	0,0036	0,0000	0,0000	0,0062	0,0013	0,0019
Watford	0,0024	0,0000	0,0000	0,0060	0,0038	0,0019
Norwich City	0,0023	0,0000	0,0000	0,0060	0,0022	0,0029

Resultados de eficiencia a través de la optimización DEA

En este trabajo, se utilizan modelos de optimización DEA de tipo CRS en lugar de VRS, ya que se considera que se comparan equipos de fútbol profesional del mismo nivel que compiten en las principales ligas de sus países. Si existe alguna diferencia entre ellos, esta se reflejará en los datos de entrada y salida. Se decidió utilizar una orientación hacia las salidas para determinar cómo los equipos podrían mejorar su situación deportiva y económica actual con sus recursos actuales (entradas). Un resultado fundamental de los modelos de optimización DEA, es que su capacidad

de discriminación, es decir, su capacidad para proporcionar medidas de eficiencia satisfactorias, depende de tener muchas más unidades de decisión (DMU) que entradas y salidas (Thanassoulis, 2001). Por esta razón, para escribir las ecuaciones de optimización, las variables de cada subcriterio se agrupan en sus entradas y salidas que aparecen en el nivel de criterio. En otras palabras, los modelos DEA tendrán tres entradas (Rendimiento ofensivo, Rendimiento defensivo y Salarios) y dos salidas (Éxito deportivo del equipo e Ingresos). Así, la entrada de rendimiento ofensivo del equipo Liverpool corresponderá a la suma de los valores

0,0182, 0,0075 y 0,0096 que aparecen en la Tabla 14. Finalmente, los datos de entrada y salida utilizados en el modelo CCR-O aparecen en la Tabla 16.

Tabla 16. Entradas y salidas empleadas en el modelo de optimización CCR - O para la temporada 2021/2022 de la Premier League

Equipos	ENTRADAS			SALIDAS	
	Desempeño ofensivo	Desempeño defensivo	Salarios	Éxito del equipo	Ingresos
Manchester City	0,0352	0,0166	0,0250	0,2197	0,0561
Liverpool	0,0353	0,0183	0,0262	0,1101	0,0588
Chelsea	0,0285	0,0155	0,0274	0,0077	0,0463
Tottenham	0,0258	0,0172	0,0169	0,0074	0,0574
Arsenal	0,0248	0,0134	0,0171	0,0073	0,0455
Manchester Utd	0,0233	0,0135	0,0273	0,0061	0,0659
West Ham	0,0235	0,0169	0,0110	0,0058	0,0247
Leicester City	0,0249	0,0154	0,0147	0,0549	0,0179
Brighton	0,0170	0,0151	0,0093	0,0053	0,0169
Wolves	0,0156	0,0170	0,0098	0,0053	0,0141
Newcastle Utd	0,0190	0,0126	0,0137	0,0052	0,0178
Crystal Palace	0,0202	0,0147	0,0101	0,0051	0,0125
Brentford	0,0199	0,0140	0,0055	0,0048	0,0116
Aston Villa	0,0215	0,0129	0,0111	0,0047	0,0146
Southampton	0,0186	0,0124	0,0091	0,0042	0,0132
Everton	0,0191	0,0122	0,0131	0,0041	0,0165
Leeds United	0,0179	0,0104	0,0098	0,0040	0,0187
Burnley	0,0151	0,0164	0,0074	0,0036	0,0094
Watford	0,0155	0,0124	0,0063	0,0024	0,0117
Norwich City	0,0104	0,0131	0,0094	0,0023	0,0111

Para calcular la eficiencia de los 20 equipos de la Premier League durante la temporada 2021/2022, se deben resolver 20 problemas de optimización lineal para cada equipo. Por ejemplo, si se considera al Liverpool

como la DMU en evaluación, utilizando los datos de la Tabla 16 y las ecuaciones (7) a (10), se obtiene el problema de optimización lineal.

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximizar } \eta_2 = \eta \\
 & 0.0352\lambda_1 + 0.0353\lambda_2 + 0.0285\lambda_3 + \dots + 0.0104\lambda_4 \leq 0.0353 \\
 & 0.0166\lambda_1 + 0.0183\lambda_2 + 0.0155\lambda_3 + \dots + 0.0131\lambda_4 \leq 0.0183 \\
 & 0.0250\lambda_1 + 0.0262\lambda_2 + 0.0274\lambda_3 + \dots + 0.0094\lambda_4 \leq 0.0262 \\
 & 0.2197\lambda_1 + 0.1101\lambda_2 + 0.0077\lambda_3 + \dots + 0.0023\lambda_4 \geq 0.1101\eta \\
 & 0.0561\lambda_1 + 0.0588\lambda_2 + 0.0463\lambda_3 + \dots + 0.0111\lambda_4 \geq 0.0588\eta \\
 & \lambda_i \geq 0, i = 1, \dots, 20
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

La solución de (12) proporciona un valor de $\eta_2 = 1,13$. Por lo tanto, la eficiencia del

Liverpool durante la temporada 2021/2022 fue del 88,5 % ($1/\eta_2 \times 100$).

RESULTADOS

Se mostrarán la eficiencia porcentual y los puntos obtenidos para cada equipo perteneciente a La Liga y la Premier League durante las temporadas 2020/2021, 2021/2022 y 2022/2023. Fue necesario resolver 120 modelos de optimización, como el de la ecuación (12). En este trabajo se empleó el algoritmo Simplex LP del Solver de Excel en la resolución de los distintos problemas de optimización. Los puntos obtenidos para cada club se tradujeron a una escala porcentual, siendo la puntuación más alta igual al 100%. Los resultados se presentan mediante gráficos de barras con los resultados porcentuales

de eficiencia y puntos obtenidos por los diferentes equipos de cada liga durante las temporadas consideradas. Las figuras 5, 6 y 7 corresponden a los equipos de La Liga para las temporadas 2020/2021, 2021/2022 y 2022/2023, respectivamente. Las figuras 8, 9 y 10 representan lo mismo para los equipos de la Premier League. En la temporada 2020/2021, todos los partidos se celebraron a puerta cerrada debido al confinamiento por la pandemia de COVID-19. Por este motivo, la venta de entradas para todos los equipos fue nula. Las barras están ordenadas de mayor a menor según los puntos obtenidos.

Figura 5. Eficiencia y puntos para la temporada 2020/2021 de La Liga

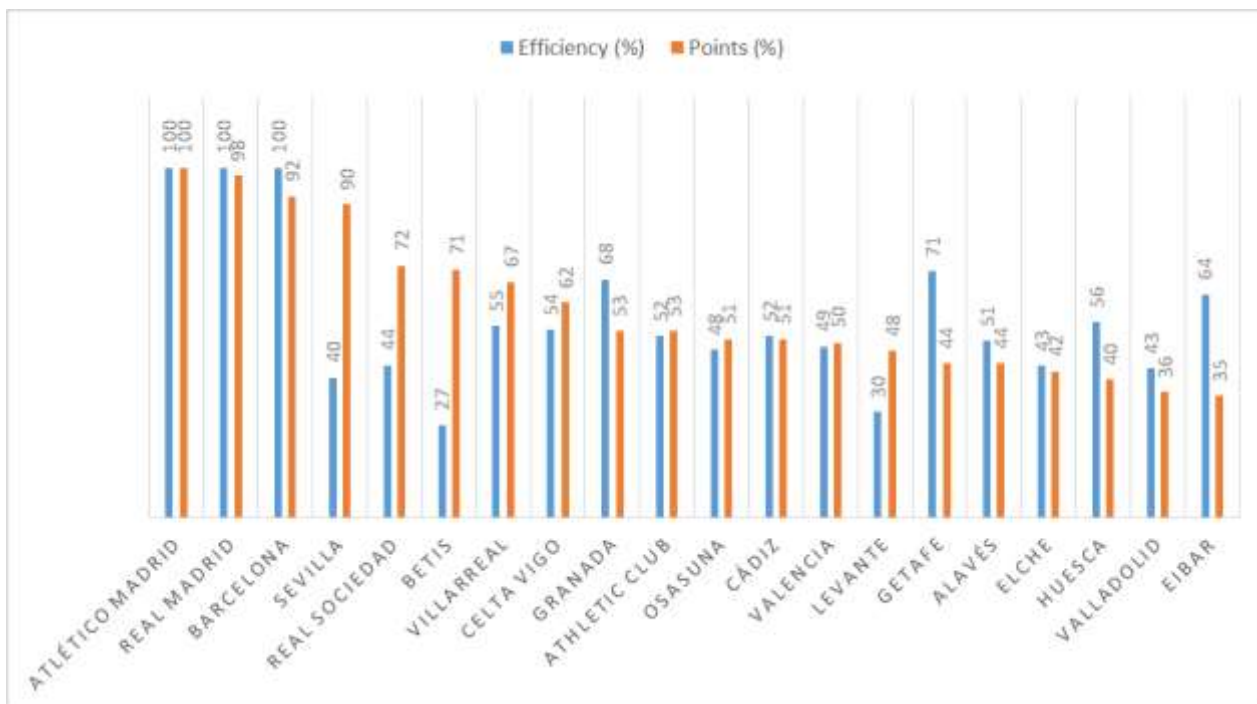


Figura 6. Eficiencia y puntos para la temporada 2021/2022 de La Liga

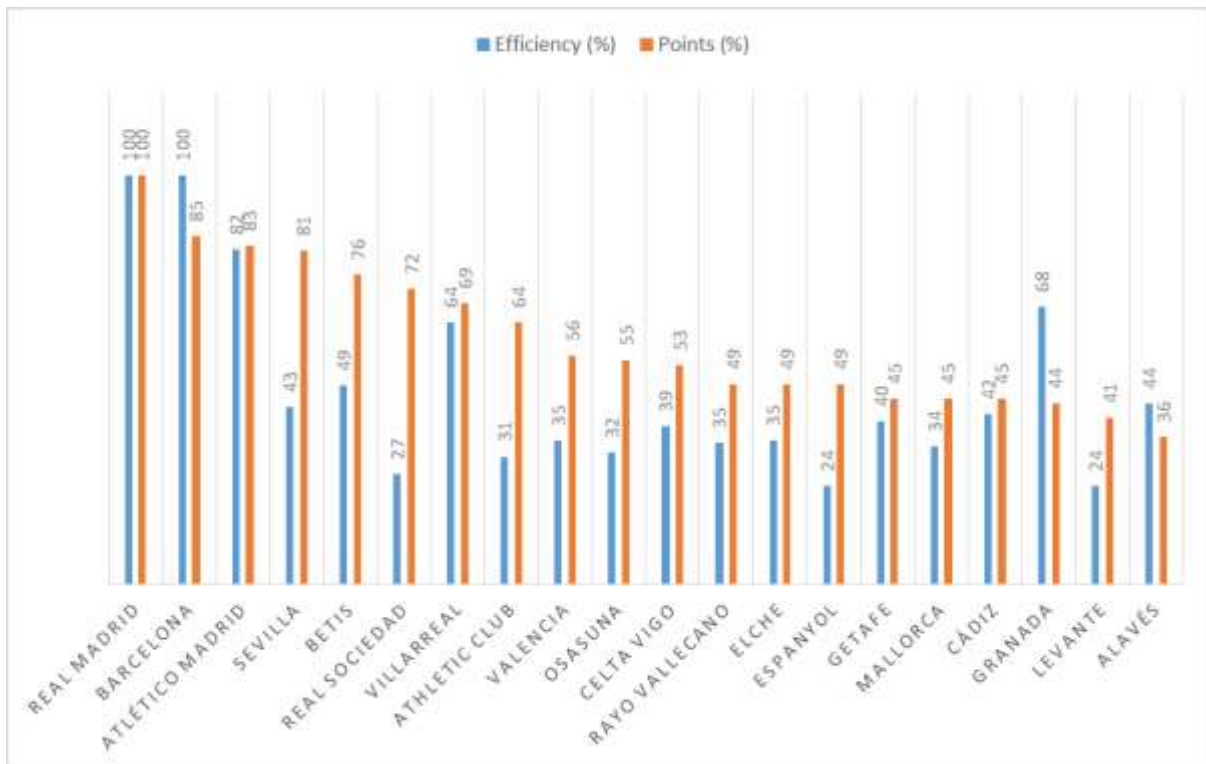


Figura 7. Eficiencia y puntos para la temporada 2022/2023 de La Liga

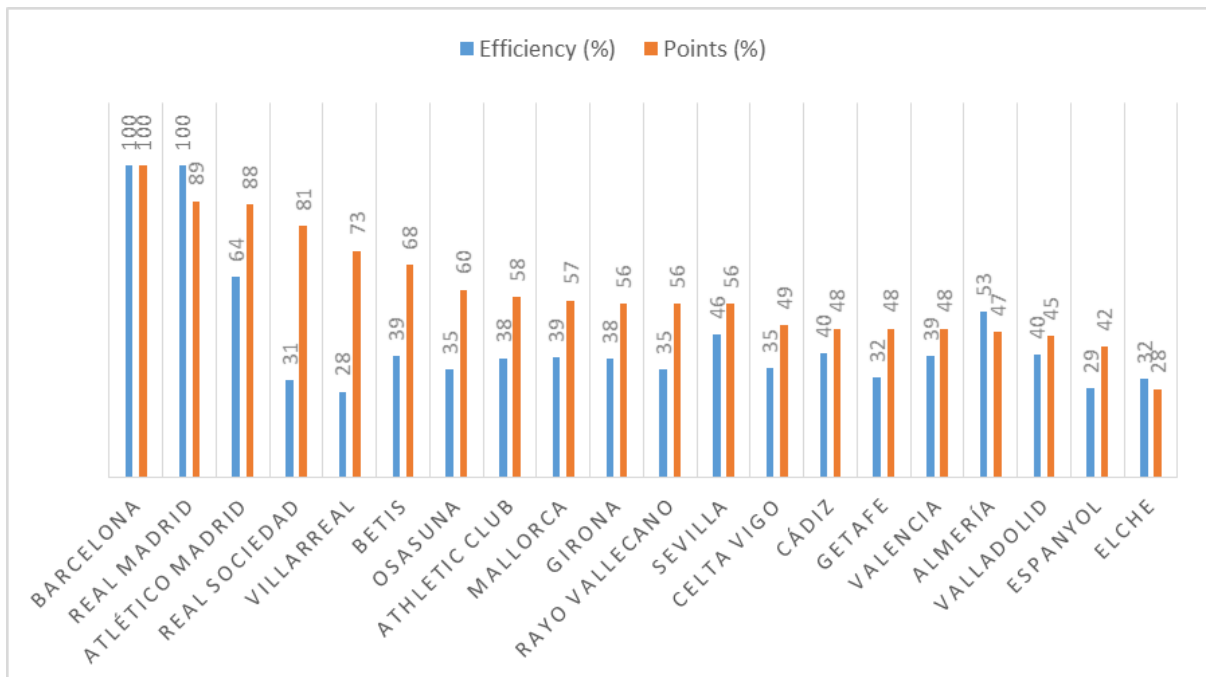


Figura 8. Eficiencia y puntos para la temporada 2020/2021 de La Premier League

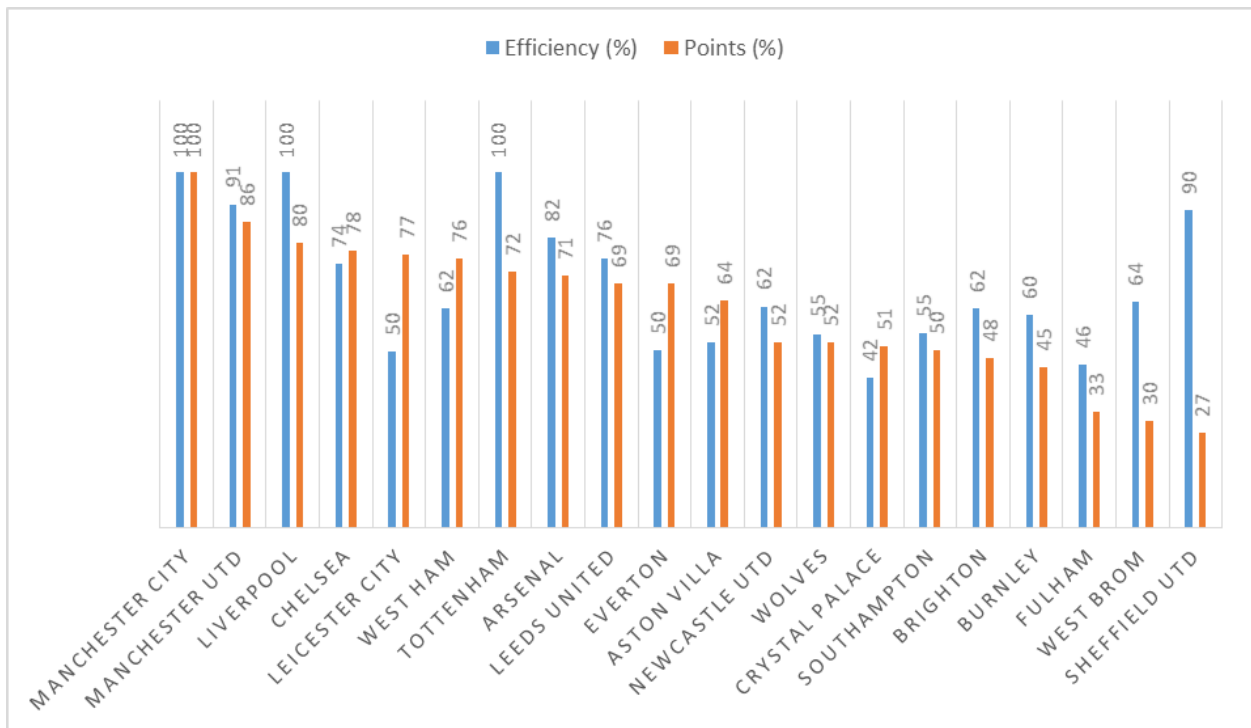
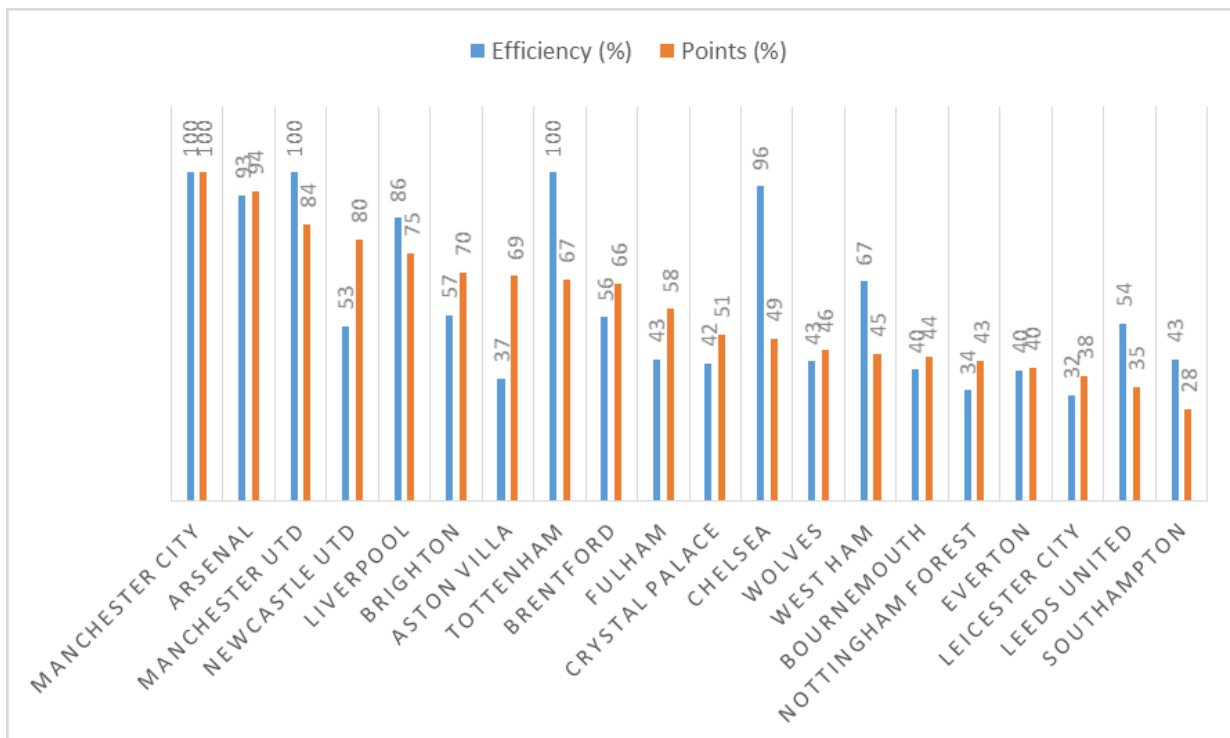


Figura 9. Eficiencia y puntos para la temporada 2021/2022 de La Premier League



Figura 10. Eficiencia y puntos para la temporada 2022/2023 de La Premier League

Discusión de resultados

Se pueden observar tres tipos de comportamiento en los gráficos: la barra de eficiencia tiene una altura similar a la barra de los puntos, menor o mayor. Cuando la barra es menor, los resultados económicos de entradas y salidas están por debajo de lo deseado, pero el éxito deportivo es satisfactorio. Si la barra de eficiencia supera la barra de puntos, ocurre lo contrario. Como ejemplo de la segunda situación, los equipos Sevilla, Real Sociedad y Betis se pueden ver en la Figura 5. Para el tercer caso, tenemos a los equipos Getafe, Huesca y Eibar en la misma figura. La relación entre las alturas de estas dos barras para cualquier equipo permite identificar comportamientos fuera de lo común y luego pueden explicarse sin dificultad

mediante el análisis de los datos de entrada y salida. Esta es una ventaja del modelo propuesto. Como primer ejemplo para ilustrar el uso del modelo, se podría considerar el Eibar, equipo que aparece en la última posición de la Figura 5. Puede resultar contradictorio que un equipo en la parte baja de la clasificación sea eficiente. Sin embargo, entre los equipos en esa parte de la clasificación, el Eibar presenta uno de los mejores resultados económicos en retransmisión audiovisual, publicidad y comercialización. Esto también se consigue aplicando bajos salarios a jugadores y cuerpo técnico. Un segundo ejemplo, conceptualmente similar al anterior, pero con mayores resultados de eficiencia, es el que ofrece el club inglés Sheffield UTD en la Figura 8. Este equipo utilizó los salarios

más bajos para jugadores y cuerpo técnico de toda la liga inglesa durante esa temporada. Sus ingresos por retransmisión audiovisual, publicidad y comercialización son comparables a los de los equipos en el último tercio de la clasificación. Adicionalmente, se puede observar que la puntuación de eficiencia no está correlacionada con la posición del equipo en la liga, y el equipo que gana el campeonato lo hace con una eficiencia perfecta del 100%.

La liga inglesa ofrece resultados de eficiencia mucho más altos que la liga española. La eficiencia promedio de La Liga durante las temporadas fue de alrededor del 50%, y en el caso de la Premier League, fue de casi el 70%. Alrededor del 30% de los equipos

españoles están por encima de la eficiencia promedio de La Liga, mientras que el 40% de los equipos de la Premier League están por encima del promedio. Si en el caso de la liga inglesa, se toma el promedio de eficiencia de la liga española como umbral, el porcentaje de equipos ingleses por encima de este valor sería aproximadamente del 62%. En ambas ligas, se pudo observar que la eficiencia fue mejor durante la temporada 2020/2021 (eficiencia promedio más alta); una explicación es que debido a la pandemia de COVID-19, todos los equipos no tuvieron ingresos por venta de entradas, lo que provocó que todos fueran evaluados de la misma manera, en las temporadas siguientes este resultado fue diferente de cero, lo que genera una variabilidad que no estaba presente antes.

CONCLUSIONES

Con datos de las temporadas 2020/2021 a la 2022/2023, se estudió la eficiencia de los equipos de fútbol de La Liga española y la Premier League inglesa mediante un modelo de toma de decisiones multicriterio que combina los métodos AHP y DEA. El primero busca ponderar la importancia de las entradas y salidas del modelo DEA, y el segundo, medir la eficiencia de los equipos. El objetivo es mejorar la medida de eficiencia proporcionada por DEA, desglosando sus entradas y salidas en atributos cuya importancia relativa se clasificó mediante AHP.

Se pueden considerar ciertos aspectos que mejorarían el modelo DEA en cuanto a la definición de entradas y salidas. El

porcentaje de ocupación del estadio podría complementar la salida de Venta de Entradas. Además de considerar los salarios (jugadores y personal técnico), se podría incorporar una entrada que abarque otros gastos del equipo de fútbol. Esta entrada adicional describiría mejor los recursos del equipo. Por otro lado, aunque no se incluyen los resultados para no hacer más extenso el artículo, también se realizaron cálculos de eficiencia con los modelos de optimización CCR-I, BCC-I y BCC-O. Los resultados obtenidos para estas variantes son muy similares a los presentados en este trabajo para el modelo CCR-O. Igualmente, el modelo CCR-O, se empleó con datos normalizados y sin normalizar y los resultados difieren muy poco. Por lo que la hipótesis de normalizar

los datos para que éstos sean más influenciados por los valores de los pesos obtenidos por el método AHP podría no ser del todo válida.

Si bien es cierto que el propósito de los equipos es ganar la competición en la que participan, el objetivo final de cualquier organización es la supervivencia. Sin embargo, estos dos objetivos están vinculados. Un equipo sobrevive si aumenta sus ingresos mediante derechos de transmisión, publicidad, comercialización y venta de entradas, manteniendo al mismo tiempo los salarios de los jugadores y el personal técnico dentro de niveles adecuados. Un equipo de fútbol no puede ser económicamente eficiente si no se cumplen los objetivos

deportivos. En general, se recomienda que cualquier organización alcance sus objetivos eficientemente. Por esta razón, el método propuesto es relevante para evaluar si los resultados se han obtenido utilizando los recursos disponibles de la mejor manera posible. Finalmente, aunque el método AHP-DEA se aplicó al ámbito del fútbol, puede extenderse sin dificultad a otras áreas de la toma de decisiones que requieren medidas de eficiencia.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por el Programa de Investigación de la Universidad Metropolitana de Caracas, Venezuela.

REFERENCIAS

Avkiran, N. K. (1999). An application reference for data envelopment analysis in branch banking: helping the novice researcher. *International Journal of Bank Marketing*, 17(5), 206-220.

<https://doi.org/10.1108/02652329910292675>

Banker, R. D., Charnes, A., y Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078-1092.

<https://www.jstor.org/stable/2631725>

Bhat, Z. U. H., Sultana, D., y Dar, Q. F. (2019). A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA). Approach in sports. *Journal of Sports Economics y Management*, 9(2), 82-109.

http://sportsem.uv.es/j_sports_and_em/index.php/JSEM/article/view/163/212

Boscá, J. E., Liern, V., Martínez, A., y Sala, R. (2009). Increasing offensive or defensive

efficiency? An analysis of Italian and Spanish football. *Omega*, 37(1), 63-78.

<https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.08.002>

Calôba, G. M., y Lins, M. P. E. (2006). Performance assessment of the soccer teams in Brazil using DEA. *Pesquisa Operacional*, 26, 521-536.

<https://doi.org/10.1590/S0101-74382006000300005>

Charnes, A., Cooper, W. W., y Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision-making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444.

[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)

Coelli, T. J., Rao, D. S. P., O'Donnell, C. J., y Battese, G. E. (2005). *An introduction to efficiency and productivity analysis*. Springer science y business media.

<https://doi.org/10.1007/b136381>

- Dawson, P., Dobson, S., y Gerrard, B. (2000a). Estimating coaching efficiency in professional team sports: Evidence from English association football. *Scottish Journal of Political Economy*, 47(4), 399-421. <https://doi.org/10.1111/1467-9485.00170>
- Dawson, P., Dobson, S., y Gerrard, B. (2000b). Stochastic frontiers and the temporal structure of managerial efficiency in English soccer. *Journal of Sports Economics*, 1(4), 341-362. <https://doi.org/10.1177/152700250000100402>
- Dávila, C. G. T., y Cebrián, L. I. G. (2012). Eficiencia y resultados deportivos: aplicación a la liga mexicana de fútbol. *Revista Movimiento Humano*, (3), 61-76. <https://raco.cat/index.php/RevMovHum/article/view/258813>
- Espitia-Escuer, M., y García-Cebrián, L. I. (2004). Measuring the efficiency of Spanish first-division soccer teams. *Journal of Sports Economics*, 5(4), 329-346. <https://doi.org/10.1177/1527002503258047>
- Espitia-Escuer, M., y García-Cebrián, L. I. (2006). Performance in sports teams: Results and potential in the professional soccer league in Spain. *Management Decision*, 44(8), 1020-1030. <https://doi.org/10.1108/00251740610690595>
- Espitia-Escuer, M., y García-Cebrián, L. I. (2008). Measuring the productivity of Spanish first division soccer teams. *European Sport Management Quarterly*, 8(3), 229-246. <https://doi.org/10.1080/16184740802224142>
- Espitia-Escuer, M., y García-Cebrián, L. I. (2010). Measurement of the efficiency of football teams in the Champions League. *Managerial and Decision Economics*, 31(6), 373-386. <https://doi.org/10.1002/mde.1491>
- FBref (n.d.) (Sitio Web Oficial) About FBref. <https://fbref.com/en/about/>
- García-Sánchez, I. M. (2007). Efficiency and effectiveness of Spanish football teams: a three-stage-DEA approach. *Central European Journal of Operations Research*, 15, 21-45. <https://doi.org/10.1007/s10100-006-0017-4>
- Haas, D., Kocher, M. G., y Sutter, M. (2004). Measuring the efficiency of German football teams by data envelopment analysis. *Central European Journal of Operations Research*, 12(3), 251-268. <https://hdl.handle.net/11858/00-001M-0000-002D-9F69-A>
- Lee, Y. H. (2009). Evaluating Management Efficiency of Korean Professional Teams Using Data Envelopment Analysis (DEA). *International Journal of Applied Sports Sciences*, 21(2). <https://doi.org/10.4236/ajor.2012.22020>
- Liberatore, M. J., and Nydick, R. L. (2008). The analytic hierarchy process in medical and health care decision making: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 189(1), 194-207. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.001>
- Nisel, S., and Özdemir, M. (2016). Analytic hierarchy process y analytic network process in sport: a comprehensive literature review. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 8(3), 405-429. <https://doi.org/10.13033/ijahp.v8i3.448>
- Opta (n.d.) (Sitio Web Oficial) Opta Power Ranking. <https://theanalyst.com/2024/03/the-strongest-leagues-in-world-football-opta-power-rankings>
- Panchal, S., y Shrivastava, A. K. (2022). Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of National Highway 5 in India. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 1016-26. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.021>
- Roboredo, M. C., Aizemberg, L., y Meza, L. A. (2015). The DEA game cross-efficiency model applied to the Brazilian football championship. *Procedia Computer Science*, 55, 758-763. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.161>

- Saaty, T. L. (1980). *The Analytical Hierarchy Process*. McGraw-Hill.
- Saaty, T. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48, 9-26. <https://doi.org/10.13128/Aestimium-7138>
- Saaty, T. L. (2000). *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process*. RWS.
- Saaty, T. (2008). Decision-making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Thanassoulis, E. (2001). *Introduction to the Theory and Application of Data Envelopment Analysis*. Kluwer Academic Publishers.
- Teppa-Garran, P., y Fernández-Da Costa, C. (2023). Modelo para la selección de lanzadores de béisbol empleando el Proceso Analítico Jerárquico a través de la evaluación de su desempeño integral. *Revista Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias*, 8(30), 7-22. <https://www.revistas.uc.edu.ve/index.php/riia/article/view/478>
- Teppa-Garran, P., y Fernández-Da Costa, C. (2024). Application of the AHP method in selecting baseball pitchers. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 16(1). <https://doi.org/10.13033/ijahp.v16i1.1094>
- Teppa-Garran, P., Guzman, A., y Catapano, E. (2024). Estimación del valor de mercado de un jugador de fútbol: caso Messi y Ronaldo. *Tekhné*, 27(1), 76-89. <https://doi.org/10.62876/tekhn.v27i1.6322>
- UEFA (n.d.) (Sitio Web Oficial) *UEFA Rankings* <https://www.uefa.com/nationalassociations/uefarankings/>
- Vaidya, O. S., and Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1), 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>
- Villa, G., y Lozano, S. (2019). Assessing offensive/defensive strategies in a football match using DEA. *International Journal of Sport Finance*, 14(3), 131-146. <https://doi.org/10.32731/IJSF.143.082019.01>
- Veisi, H., Deihimfard, R., Shahmohammadi, A., and Hydarzadeh, Y. (2022). Application of the analytic hierarchy process (AHP) in a multi-criteria selection of agricultural irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 267, 107619. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107619>
- Yong, W. (2021, March). Analytic Hierarchy Process and intelligent evaluation of regional sports economic data. In 2021, *International Conf. on Intelligent Transportation, Big Data y Smart City* (ICITBS). <https://doi.org/10.1109/ICITBS53129.2021.00098>
- Xu, W. (2018). Operational efficiency of the football team in the Chinese Super League with DEA. *International Business Research*, 11(3), 1-9. <https://doi.org/10.5539/ibr.v11n3p1>

Autores

Pedro Teppa-Garran. Ingeniero Electricista, Universidad Metropolitana; MSc Ingeniería Electrónica, MSc Matemáticas, Universidad Simón Bolívar, Venezuela; PhD Sistemas de Control, Université Paul Sabatier, Francia; Postdoctorado en Sistemas de Control, LAAS – CNRS, Francia. Profesor Titular, Departamento de Gestión de Proyectos y Sistemas, Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6384-3185>

Email: pteppa@unimet.edu.ve

Ezequiel Fernández. Ingeniero de Sistemas, Ingeniero de Producción Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1776-0812>

Email: ezequiel.fernandez@correo.unimet.edu.ve

Recibido: 12-06-2025

Aceptado: 27-10-2025

Reducción de pérdidas en tratamiento de degradaciones de tubos de acero mediante la aplicación del Kobetsu-Kaizen

Reduction of losses in treatment of steel tube degradation through application of the Kobetsu-Kaizen

Kimberly Colls Romero, Jesús Rangel Pérez, Jadlyn González de Urquiola

Palabras clave: Kobetsu Kaizen, manufactura de clase mundial, reducción de pérdidas, tubos de acero

Key words: Kobetsu Kaizen, world class manufacturing, reduction of losses, steel tubes

RESUMEN

La investigación se centra en el sistema de dosificación de degradaciones de la laminadora en una empresa dedicada a la producción y comercialización de tubos de acero. Este sistema, diseñado para la extracción y desvío automático de la tubería no conforme, presentaba fallas que obligaban al retiro manual del material defectuoso, generando paradas de línea recurrentes. El objetivo principal fue reducir las pérdidas asociadas al tratamiento de degradaciones bajo el enfoque de Manufactura de Clase Mundial. Mediante la metodología Kobetsu Kaizen y herramientas como 5W+2H, los 5 ¿por qué? y el análisis DOFA, se determinó que las fallas de diseño causaban el 26,405% de las paradas, con un costo de 14,768 \$/TM. En búsqueda de un sistema "cero fallas", se implementaron acciones basadas en análisis estadístico, muestreo de trabajo y estudios ergonómicos. Los resultados muestran la eliminación total de las pérdidas por recolección de tubería no conforme y un aumento del 14,72% en la productividad. El tiempo de recuperación de la inversión fue de 11 días. Finalmente, se estandarizó el proceso mediante instructivos de Prácticas Seguras de Operación, manuales de uso y lecciones puntuales, asegurando la sostenibilidad de la mejora.

ABSTRACT

The research focuses on the defect disposal system of a steel tube rolling mill at a company that produces and sells steel pipes. This system, designed for the automatic extraction and diversion of non-conforming pipe, had flaws that necessitated manual removal of the defective material, resulting in recurring line stoppages. The main objective was to reduce the losses associated with defect disposal using a World-Class Manufacturing approach. Through the Kobetsu Kaizen methodology and tools such as 5W+2H, the 5 Whys, and SWOT analysis, it was determined that design flaws caused 26.405% of the stoppages, at a cost of \$14,768/MT. In pursuit of a "zero-defect" system, actions based on statistical analysis, work sampling, and ergonomic studies were implemented. The results show the complete elimination of losses due to non-conforming pipe collection and a 14.72% increase in productivity. The investment recovery time was 11 days. Finally, the process was standardized through Safe Operating Practices guidelines, user manuals, and specific lessons, ensuring the sustainability of the improvement.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de globalización y la integración de mercados individuales, así como el desarrollo dinámico de la economía, representan un desafío para todas las organizaciones, las cuales deben optimizar sus procesos con el fin de ser competitivas (Wolska et al., 2023). En este contexto, es indispensable que las empresas usen eficientemente sus recursos, no solo para alcanzar una estabilidad operativa, sino también como una estrategia fundamental para incrementar la productividad, asegurando su rentabilidad y el crecimiento sostenible (Surya et al., 2024). Por lo tanto, las organizaciones líderes se enfocan en implementar marcos de gestión que les permita realizar cambios de los métodos tradicionales a sistemas altamente eficientes, donde se logre la reducción de costos y la mejora de procesos sin sacrificar el valor entregado al cliente (Amit, 2024).

Una de las metodologías más robustas para enfrentar estos desafíos es el Mantenimiento Productivo Total (MPT, o TPM, por sus siglas en inglés), que se describe como un enfoque táctico para reducir las pérdidas mayores en el sector manufacturero y mejorar la efectividad operativa (Sandeep et al., 2023). De acuerdo con Kumar et al. (2017), esta perspectiva japonesa, que fue creada por el *Japan Institute of Plant Maintenance* (JIPM), se ha vuelto indispensable en sectores que usan maquinarias de forma intensiva, ya que permite maximizar la disponibilidad de los equipos en mercados donde la la calidad y

el costo definen la competitividad de la empresa. En este sentido, Raj et al. (2017) destacan que el éxito del TPM está en establecer una cultura corporativa que tenga como propósito la “reducción a cero”: cero accidentes, cero defectos y cero averías. Este punto de vista es respaldado por Haider et al. (2023), quienes enfatizan que la participación activa de todos los empleados es clave para eliminar las causas raíz de las fallas. En este orden de ideas, una implementación exitosa del TPM tiene un impacto directo en el desempeño operativo y mejora la Efectividad Total del Equipo (OEE, por sus siglas en inglés), permitiendo alcanzar estándares de calidad más altos (Singh y Fentaw, 2023) y una mayor capacidad de respuesta en los fujos de producción (Kumar et al., 2022).

Dentro de los pilares del TPM, el Kobetsu Kaizen (o *Focused Improvement*) juega un papel importante, ya que está orientado a la eliminación sistemática de pérdidas e ineficiencias, y a la mejora continua de la fiabilidad y rendimiento de los equipos. De acuerdo con Wolska et al. (2023), el Kobetsu Kaizen implica la búsqueda constante de oportunidades para reducir los problemas que ocurren con las máquinas y dispositivos existentes, así como para encontrar maneras de mejorar la eficiencia y la calidad del trabajo; la clave es la colaboración constante entre los empleados de producción y mantenimiento, priorizando las pérdidas más importantes y eliminándolas eficazmente. El objetivo primordial del Kobetsu Kaizen es la

eliminación sistemática de las "16 grandes pérdidas" que afectan la OEE, permitiendo así la mejora del rendimiento de la planta (Raj et al., 2021). Al priorizar y erradicar las ineficiencias más significativas, el Kobetsu Kaizen se convierte en la herramienta clave para lograr la certificación de Manufactura de Clase Mundial (Kumar et al., 2017).

Existen muchas investigaciones que confirman que la mejora focalizada es viable en las industrias. Estos estudios sirven de referencia para comprender cómo al aplicar el TPM y sus pilares (como el Kobetsu Kaizen) se pueden transformar procesos ineficientes en operaciones eficientes. En este sentido, Alvarez Divizzia (2021) realizó una investigación con el propósito de incrementar la eficiencia operacional en una línea de envasado de tomate, mediante la metodología Kobetsu Kaizen. A partir de sus resultados se evidencia que la eliminación sistemática de pérdidas, con base en herramientas de análisis de fallas, aumenta la productividad de la organización, destacando que la mejora focalizada es una excelente herramienta.

Asimismo, Bernal Forero y Parra Cárdenas (2020) proponen que la gestión integral bajo el enfoque TPM garantiza que las mejoras técnicas se mantengan a largo plazo mediante la participación activa del personal. En su estudio sobre una planta de ensamblaje, concluyen que realizar un diagnóstico precisa, junto con el establecimiento de prioridades en las acciones correctivas, constituye el primer paso para reducir las paradas no programadas. Estos antecedentes

establecen un referente práctico para abordar problemas similares en el sector metalmecánico.

Considerando la efectividad de las mejoras focalizadas, Industrias Unicon, C.A., líder en la producción de tubos de acero con costura ERW del grupo ArcelorMittal, se trazó desde el año 2011 la meta de alcanzar la certificación MCM. Bajo este enfoque, la organización ha concentrado sus esfuerzos en erradicar las pérdidas y, tras un análisis de las ineficiencias existentes en sus procesos, se identificó a la laminadora 09, como un foco principal que estaba ocasionando pérdidas a la empresa. Específicamente, el sistema de dosificación de degradaciones (tubería de 2da, 3era y 4ta calidad) presentaba fallas críticas de equipo y diseño, lo cual llevó a la empresa a improvisar una cuna que, por limitaciones de espacio y deficiencias en el diseño, tiene una capacidad inferior a la cantidad de tubos degradados por turno. Esto provocaba cuellos de botella, con una duración de 30-40 minutos aproximadamente, para extraer las degradaciones de forma segura; además de esto, se tuvo que disminuir la velocidad de la línea con el fin de identificar los tubos que venían con defectos, para dosificarlos y separarlos de los tubos de 1era calidad. Esta situación ha representado un problema de impacto negativo en la productividad ya que las paradas no programadas se tradujeron en pérdidas de \$556.471,78, en un período de tres años.

De no corregirse estas deficiencias en el sistema de dosificación, la persistencia de paradas no programada y soluciones

improvisadas alejarían a la organización de sus metas de eficiencia global y, por consiguiente, representaría un obstáculo para alcanzar su certificación MCM. Por todo lo anteriormente expuesto, surgió la necesidad de realizar un análisis que permitiera establecer propuestas para solventar las problemáticas en cuanto a los métodos actuales para manejar las

degradaciones. En este sentido, el objetivo de la presente investigación se basa en reducir las pérdidas asociadas al tratamiento actual para las degradaciones de la laminadora 09 de la Planta de Producción Productos Livianos, P-3, de Industrias Unicon, C.A. bajo el enfoque Manufactura de Clase Mundial.

METODOLOGÍA

El presente trabajo siguió la modalidad de proyecto factible, como lo describe UPEL (2016), donde se desarrollaron propuestas correctivas, preventivas y de mejora para la erradicación de las pérdidas del tipo “falla de equipos” en Industrias Unicon, C.A. La investigación es de tipo descriptiva, con diseño de campo, no experimental, de acuerdo con la definición de Martínez Fuentes, y Vivas Escalante (2022). Como fuente de observación primaria se realizaron observaciones directas y entrevistas no estructuradas al personal involucrado en la línea de producción. Debido al uso de la metodología Kobetsu Kaizen, se llevaron a cabo reuniones planificadas, en las cuales fue necesario que los integrantes del trabajo, en presencia de personal capacitado de la empresa, aportaran datos pertinentes sobre la problemática. Fue establecida como fuente secundaria, los registros históricos proporcionados por la empresa para la cuantificación de minutos de parada en la línea de producción y otros datos de interés.

Con el fin de analizar los datos referentes a variables que requerían un estudio estadístico en los equipos de la línea de producción seleccionada, se realizaron modelos de regresión que permitieron proyectar y analizar el comportamiento de los datos como: velocidad de la línea de producción, tiempo de recorrido del tubo y distancia entre tubos.

La investigación se desarrolló en cuatro fases:

Fase I. Estudio de la situación actual del área de empaquetado de la laminadora 09: en esta fase, se cuantificaron los minutos de parada generados en la laminadora 09 durante un período de tres años, los cuales fueron analizados por el método de selección de los proyectos de Mejora Focalizada para la erradicación de pérdidas. Se establecieron los KPI's (*Key Performance Indicators* – Indicadores Clave de Rendimiento), para el análisis del nivel de pérdida. Se realizó un análisis crítico comenzando por la aplicación de la técnica 5W+2H y la técnica de los 5 ¿por qué?, mediante la cual se obtuvieron las causas raíces de las deficiencias que presentaba el

sistema de dosificación de degradaciones. Con la información obtenida, se realizó una matriz DOFA mediante el análisis de todos los subequipos y procesos que intervenían en el sistema.

Fase II. Desarrollo de propuestas correctivas, preventivas y de mejora bajo la metodología Kobetsu Kaizen: se desarrollaron las propuestas de solución a las causas raíces (propuestas correctivas). Luego, se realizó un diagrama de fases, en el cual, se establecieron las condiciones en las que debía encontrarse cada componente durante la ejecución de cada evento a lo largo del proceso de dosificación de degradaciones propuesto para proyectar el funcionamiento adecuado del sistema según lo diseñado. Posteriormente, se realizó un estudio preventivo, con el objetivo de anticiparse a toda posibilidad de falla que pudiese generarse al momento en que el sistema de dosificación de degradaciones propuesto estuviera operativo. Con la información desarrollada, se establecieron las propuestas preventivas. Posteriormente, se diseñaron propuestas de mejora que permitirían hacer uso seguro y eficiente del sistema de dosificación de degradaciones y del espacio.

Fase III. Evaluación técnico - económica de las propuestas establecidas: se consideró el costo total de la inversión mediante los montos asociados a las propuestas

individuales, así como también, la evaluación de los beneficios potenciales por la implementación de las propuestas y la factibilidad a través del Tiempo de Recuperación de la Inversión (TRI). Luego de la evaluación económica, se priorizaron las mejoras mediante la metodología del puntaje ICE, cuyas siglas significan: Impacto, Costo, Facilidad, la cual permite jerarquizar las acciones de mejora según su viabilidad y retorno (Industrias Unicon, 2015) para definir la ruta lógica en un diagrama de precedencias.

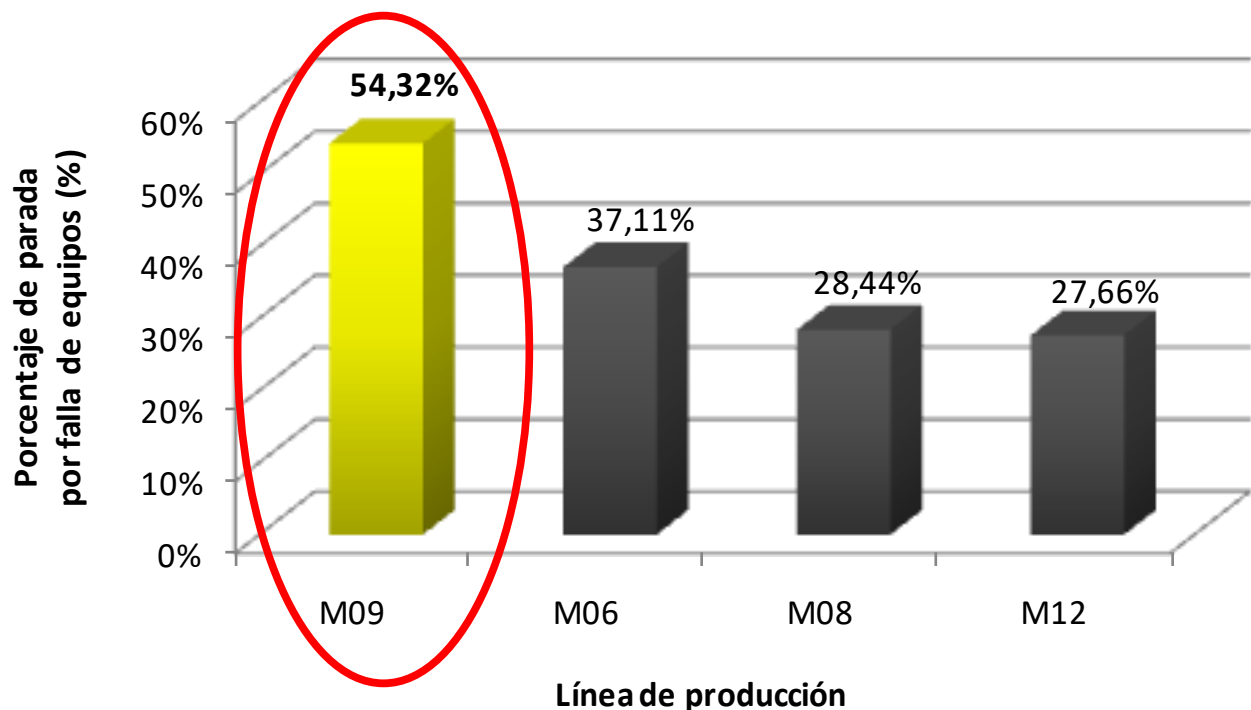
Fase IV. Ejecución de las propuestas según el orden establecido por el puntaje ICE, estableciendo de igual forma, las estandarizaciones, lecciones puntuales y Prácticas Seguras de Operación (PSO) que aseguren la armonía en el puesto de trabajo: esta fase consistió en implementar las propuestas según la priorización obtenida como resultado de la aplicación del puntaje ICE. La ejecución de dichas acciones, fue desarrollada en un lapso de dos (2) meses. Se cuantificaron los resultados derivados a la implementación realizada mediante los KPI's, indicadores técnicos y económicos, a fin de verificar el cumplimiento de los objetivos y metas establecidos. Se desarrollaron acciones de estandarización, entrenamiento al personal, PSO y lecciones puntuales, tal cual la MCM lo exige.

RESULTADOS

Para el análisis de la situación actual, se comenzó por la aplicación el método de selección de proyectos de Mejora Focalizada para la erradicación de pérdidas. Mediante el levantamiento de

diagramas de Pareto del porcentaje de parada de todas las líneas de producción, se determinó que en la laminadora 09 se concentra un 54,32% de paradas, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Nivel I: Porcentaje de parada por línea de producción para la pérdida “falta de equipo” en la empresa



Al observar el detalle de los equipos presentes en la laminadora 09, se evidencia que el 61,32% de las paradas por falla de equipo estaba asociado al área de empaquetado (Ver figura 2). Además, se detecta, de acuerdo con la figura 3, que el

79,27% de las causas de paradas del área de empaquetado eran para recoger las degradaciones, debido a las ineficiencias en el sistema de dosificación de tubería degradada.

Figura 2. Nivel II: Porcentaje de parada por equipo para el tipo de pérdida "falta de equipos" en la Laminadora 09

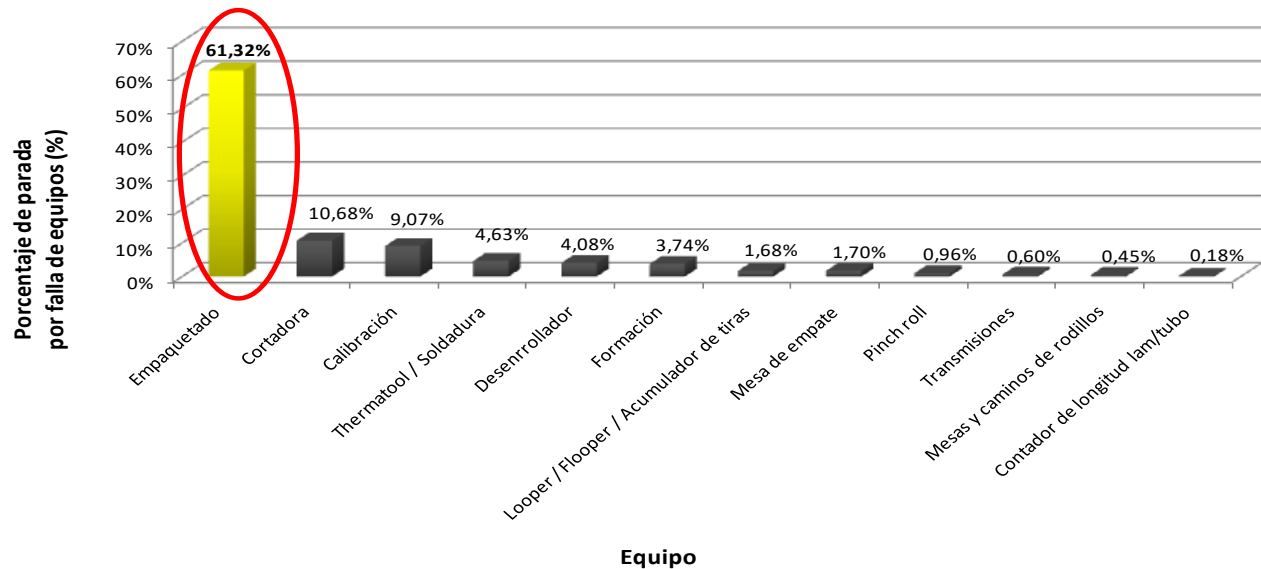
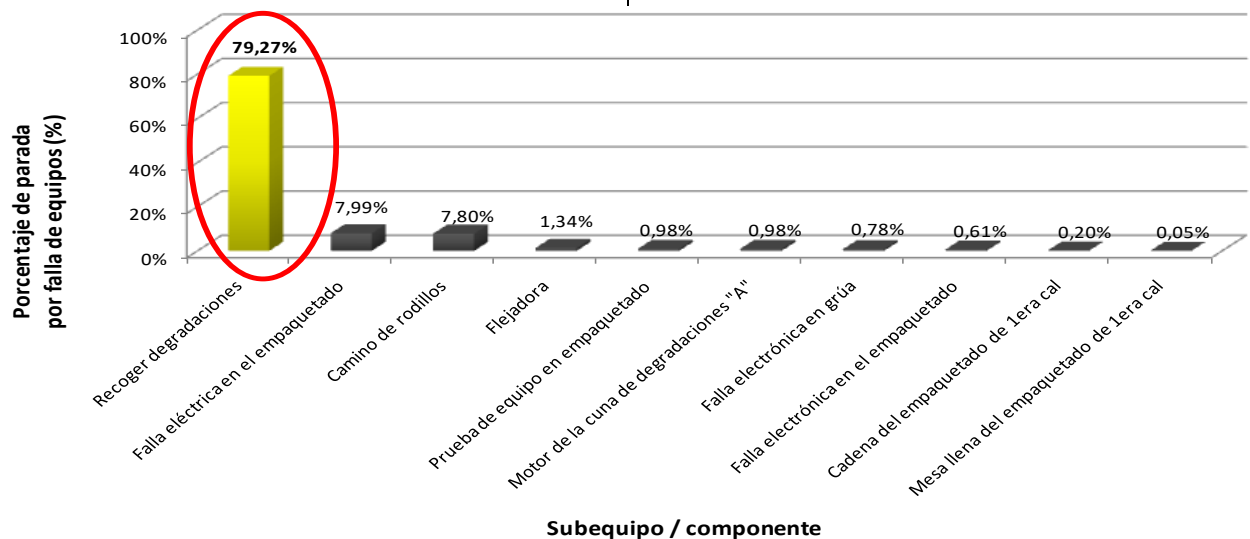


Figura 3. Nivel III: Porcentaje de parada por componente de "falta de equipo" en el área de Empaquetado de la Laminadora 09



Para cuantificar el nivel de pérdida asociada a la actividad manual de recoger degradaciones, se utilizaron indicadores, cuyos valores fueron: Porcentaje de parada = 26,405% y Tiempo Medio entre Interrupciones (MTBI) igual a 5,098 horas.

Dentro del pilar Kobetsu Kaizen, el éxito de la mejora depende de definir correctamente problema (Alvarez Divizzia, 2021). Por ello se debe realizar una "descripción del fenómeno", para lo cual la técnica 5W+2H resulta esencial. Esta herramienta permite

que una situación compleja se pueda desglosar en partes más simples, evitando suposiciones y basándose en hechos observables. Siguiendo esta metodología, una vez que se identificaron y cuantificaron

las pérdidas, se describe el fenómeno en estudio mediante la técnica 5W+2H y el funcionamiento actual del componente crítico seleccionado (ver tabla 1).

Tabla 1. *Aplicación de la técnica 5W + 2H*

Interrogante	Descripción
1. ¿Qué?	Los tubos degradados son dosificados de manera no eficaz de la línea de producción, y por esto, se presentan choques entre tubos y contra la estructura.
2. ¿Quién?	Empaquetadores de M09, cortadora, campanas, dosificadores y, la calidad del producto.
3. ¿Dónde?	En el sistema de dosificación de degradaciones a la salida de la cortadora de M09.
4. ¿Cuándo?	Al momento de dosificar las degradaciones de la línea de producción.
5. ¿Por qué?	Ya que el sistema de dosificación de degradaciones a la salida de la cortadora presenta fallas de equipo desconocidas que no permiten su correcto funcionamiento, actualmente se utiliza el sistema ubicado en el área de empaquetado de 1 ^{era} calidad, el cual, cuenta con una cuna para las degradaciones que, por limitaciones de espacio, posee una capacidad inadecuada y, por lo tanto, se debe detener el proceso de producción, para retirar las degradaciones de forma segura.
6. ¿Cómo?	El diseño del sistema de dosificación no permite dosificar el tubo degradado, antes de que el siguiente tubo se posicione para la dosificación, además, para velocidades altas (mayores a 80 m/min), la dosificación no es eficaz.
7. ¿Frecuencia?	La cuna del sistema de dosificación de degradaciones en el área de empaquetado de 1 ^{era} calidad, alcanza su máxima capacidad aproximadamente dos veces por turno y, se debe detener el proceso de producción entre 20-30 minutos cada vez que ocurre este fenómeno.

Como se muestra en el análisis 5W+2H detallado en la tabla 1, la problemática observada en la Laminadora 09 representa un obstáculo para el flujo de la producción.

Aplicando la técnica de los 5 ¿por qué? (véase tabla 2) se procede a la identificación de las causas raíces que generaban las fallas.

Tabla 2. *Aplicación de la técnica de los cinco ¿por qué?*

¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?
Los tubos chocan al momento de ser dosificados de la línea de producción, para diferentes velocidades de línea.	La sincronización del sistema de dosificación de degradaciones se realiza de manera temporizada.	-	-	-
Para velocidades mayores a 80 m/min de la línea de producción, el tubo no es levantado de manera uniforme.	El punto de dosificación de los tubos degradados no es constante para todas las velocidades.	La sincronización del sistema de dosificación de degradaciones es temporizada.	-	-
El tubo siguiente al que está siendo dosificado, choca contra los dosificadores.	Las dimensiones del perfil de los dosificadores no permiten la dosificación continua.	-	-	-
El tubo queda atrapado en la línea de producción al momento de ser dosificado.	La estructura del sensor posee un área superior excesiva	-	-	-

Es importante destacar que la programación temporizada sería válida para un sistema de dosificación cuya velocidad de línea fuese constante o con pequeñas variaciones; sin embargo, siendo este el caso en el cual las velocidades fluctúan para rangos grandes (65 m/min – 150 m/min), esto no es efectivo ya que los parámetros de dosificación no se comportan igual y generan que, el punto de dosificación de los tubos, sea diferente en cada velocidad entre el punto de dosificación deseado y el real.

Mediante esta técnica, se obtuvo que la ineficiencia del sistema es causada por una sincronización que no permite que, independientemente de la velocidad de línea, el tubo se posicione en un punto en el cual sea segura su expulsión —sin

posibilidad de choques entre tubos y contra la estructura—. Además, el perfil de los dosificadores impide el flujo continuo de los tubos en esta área, así como el borde excesivo del área superior del sensor inductivo del sistema. En este punto, se identificó la ausencia del motoreductor del sistema debido a fallas en el mismo.

Posteriormente, se realizó un análisis FODA (Tabla 3) de lo cual se pueden generar estrategias como: la integración del equipo rotopulser al sistema, por ser ideal para la ubicación de la falla, indiferentemente de la velocidad de la laminadora; además de que se reservaría materia prima para la ejecución posterior de pruebas y se solicitaría apoyo al personal eléctrico y de mecánica.

Tabla 3. Matriz FODA del sistema de dosificación de degradaciones en la Laminadora 09

FORTALEZAS	DEBILIDADES
1. La detección de la falla es realizada de manera automática por el NDT. 2. El sistema cuenta con una cantidad adecuada de dosificadores que proporcionan un levantamiento estable de la tubería si está distribuido de forma equitativa. 3. El motor presente (21 rpm), cuenta con las condiciones adecuadas para dosificar la tubería degradada. 4. La mesa de acumulación de degradaciones es de fácil acceso. 5. La laminadora 09 posee actualmente un nivel de producción estable.	1. La sincronización del sistema es temporizada desde que el NDT detecta la falla, lo cual genera que la dosificación no sea efectiva para todas las velocidades de la máquina. 2. Los dosificadores no poseen un perfil adecuado que permitan la dosificación continua. 3. Riesgo potencial por la cercanía existente entre el puesto de trabajo y la laminadora (área de 6 m²).
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
1. Utilización del sub-equipos rotopulser para ubicar virtualmente el desplazamiento de la falla en la tubería. 2. Pueden ejecutarse proyectos Kaizen para la erradicación de pérdidas por seguridad y salud. 3. Se cuenta con un espacio potencial que puede permitir la clasificación inmediata de las degradaciones en el área de inspección. 4. La empresa tiene alta disposición para la ejecución de proyectos orientados a la consecución de los objetivos de la MCM.	1. Situación económica del país que limita las inversiones correspondientes al proyecto de gran impacto económico. 2. Altos tiempos de espera en la realización de pruebas del proyecto de mejora debido a que se paralice la máquina por falta de materia prima.

Diseño de propuestas

Luego del análisis realizado a la situación actual, el primer paso para lograr el funcionamiento efectivo del sistema, ha sido el desarrollar las propuestas correctivas a las causas raíces identificadas por la técnica de los cinco ¿por qué?, para, posteriormente, realizar las propuestas preventivas a modo de evitar o reducir cualquier posibilidad de falla del sistema diseñado y finalmente, establecer propuestas de mejora que aumenten la

efectividad del mismo, tal como lo propone el enfoque MCM.

Propuestas correctivas

Propuesta correctiva 1: adecuación del perfil de los dosificadores. Mediante un estudio del tiempo de giro de los dosificadores hasta una posición de 30° que permita el paso continuo entre tubos mientras que se dosifica, se identificó la necesidad de la disminución del grosor de los dosificadores aproximadamente en un 70%, es decir, debe llevarse hasta 13 mm el ancho del perfil, mediante el cual, se

asegura que el dosificador aún tiene la fortaleza de expulsar tubos degradados de la línea de producción y que se obtiene un tiempo de giro menor.

Propuesta correctiva 2: diseño de la programación del sistema de dosificación de degradaciones. En concordancia con las estrategias generadas en la matriz DOFA, el cambio de programación temporizada a una que funcione independientemente de la velocidad de la línea de producción, es propuesta mediante la inclusión del equipo rotopulser al sistema de dosificación de degradaciones. Para estudiar las interacciones de los sub-equipos, se utilizó la representación gráfica de la secuencia de movimientos realizados por el sistema de dosificación mediante un diagrama de fases y con esto, construir la programación básica del sistema. El establecimiento del punto seguro y efectivo de dosificación, fue establecido mediante un estudio estadístico para el análisis del comportamiento del tiempo de separación entre tubos para las diferentes velocidades de línea de producción. Por la proyección realizada, se realizó un plan de prueba, cuya ejecución, permite determinar el punto real de dosificación efectivo del sistema.

Propuesta correctiva 3: reparación e instalación del motoreductor del sistema de dosificación de degradaciones. Según el personal de mantenimiento de la empresa, el motor presentó un cortocircuito, por tanto, requiere ser rebobinado. Esta operación, se propone que sea realizada por el personal de mantenimiento de la empresa; sin embargo, debe generarse una

solicitud para la adquisición de insumos para realizar el trabajo de rebobinado.

Propuesta correctiva N° 4: adecuación del área superior de la estructura del sensor inductivo. Para realizar la dosificación del tubo de forma estable, es necesario reducir la parte superior de la guarda protectora del sensor, a fin de evitar cualquier posibilidad de que el tubo degradado, al ser dosificado, quede estancado en la línea de producción.

Propuestas preventivas

La aplicación de la herramienta por qué – por qué, inicia con la afirmación de que el sistema de dosificación de degradaciones no realiza su función efectivamente, para luego, establecer las propuestas preventivas con el propósito de proteger el sistema de dosificación de cualquier irregularidad futura.

Propuesta preventiva 1: procedimiento para el apagado seguro del NDT. El apagado incorrecto del equipo NDT (Non Destructive Testing – Ensayo No Destructivo) el cual detecta las fallas presentes en la tubería en línea, se presenta debido a que el personal, con frecuencia, no conoce cómo realizar el procedimiento de manera adecuada por la constante rotación que existe entre las laminadoras. Debido a lo anterior, se realizó la estandarización del procedimiento para orientar a los operadores que les corresponda laborar en el área.

Propuesta preventiva 2: estándar de inspección para el contacto de las ruedas del rotopulser y el tubo en línea. Como medida preventiva ante posibles fallas de la emisión incorrecta de los pulsos por el

rotopulser, se realizó un estándar de inspección que oriente a los operadores para que verifiquen, según una frecuencia prudencial, si la palanca del sistema de ajuste se encuentra en la posición correcta, además de estandarizar esta acción para disminuir la cantidad de olvidos por los operadores y evitar que se produzcan errores en la línea de producción.

Propuesta preventiva 3: reemplazar el eje actual y realizar modificaciones al nuevo eje. El eje actual presenta deformaciones, por lo cual, el sistema de dosificación de degradaciones para altas velocidades (mayor a 80 m/min), no realiza un levantamiento uniforme de los tubos degradados al momento de expulsarlos de la línea de producción. En función a la reducción de costos, se plantea no comprar un eje a un ente externo, sino buscar material existente en la organización y adecuarlo a las condiciones que permitan una dosificación eficaz, para lo cual, fue diseñado un plano con las modificaciones al eje requeridas.

Propuesta preventiva 4: estándar de inspección para mantener el sensor en la posición adecuada. Para proteger el sistema de dosificación de posibles fallas por un giro erróneo de los dosificadores, se creó un estándar de inspección, que permitirá la revisión del sensor y de los actuadores y con esto, prevenir las irregularidades potenciales.

Propuesta preventiva 5: reducir el borde superior de la caja N° 1 de rodillos imantados. A modo de prevención para evitar cualquier desestabilización del sistema, se tiene como propuesta reducir el

borde superior de la caja de rodillos motorizados con la finalidad de evitar que el tubo cuando sea dosificado quede atrapado en la línea de producción y no permita el flujo continuo de la tubería, para lo cual, se diseñó un plano para realizar la reducción del 100 % del borde superior de la caja N° 1 de rodillos imantados.

Propuestas de mejora

Propuesta de mejora 1: cuna de clasificación de degradaciones anexa al área de dosificación. Mediante la matriz DOFA, surge la propuesta de realizar la clasificación de las degradaciones en el área donde las mismas serán dosificadas por existir un espacio potencial para el diseño. Se tiene como propuesta que el inspector realice la clasificación las degradaciones en la cuna diseñada, lo cual resultó ser factible al poseer el tiempo disponible, y fue determinado por un muestreo de trabajo que demostró que, en el caso más crítico (dosificación y clasificación de tubería con mayor velocidad (150 m/min)) se tendrían 48 minutos aproximadamente libres en esta situación. Se evaluaron las condiciones ergonómicas mediante el método REBA (*Rapid Entire Body Assessment*), obteniéndose un nivel de riesgo bajo, por lo cual no requiere acciones correctivas inmediatas (Diego-Mas, 2015).

Propuesta de mejora 2: herramienta para la medición de longitud del tubo. Con el sistema operativo al 100%, la tubería degradada sería acumulada sobre la mesa de inspección, en la que el operador mide la longitud del tubo con una cinta métrica, para lo cual, se dificulta realizar esta operación, requiriendo la colaboración de

otro operador. Se diseñó una escala anexa a la mesa de acumulación de degradaciones de forma tal que pueda obtenerse fácilmente mediante la gestión visual de la escala, la longitud de la tubería y si está en el rango aceptable por los estándares.

Propuesta de mejora 3: guarda protectora en el área de inspección. Debido a la cercanía del puesto de inspección con la laminadora y el área de dosificación de degradación, se diseñó una guarda protectora, para resguardar al trabajador ante cualquier incidente que se pueda presentar, además de que, permite

delimitar el contacto seguro del operador con la línea de producción.

Evaluación técnico-económica de las propuestas

En el diseño de las propuestas, se tuvo como prioridad utilizar materiales existentes y/o recuperables y mano de obra calificada de la empresa, por lo que, para la organización solo será un gasto efectivo real las modificaciones que se le deberán hacer al nuevo eje del sistema de dosificación. En la tabla 4, se muestra el resumen del costo de oportunidad correspondiente

Tabla 4. Resumen del costo de implementación de las propuestas

	Costos del sistema de dosificación de degradaciones cero fallas	Costo mano de obra (\$)	Costo de materiales (\$)	Costo total (\$)
PROPUESTAS CORRECTIVAS				
1	Adecuación del perfil de los dosificadores	272.50	-	272.50
2	Programación del sistema de dosificación de degradaciones	1,081.00	360.00	1,441.00
3	Reparación e instalación del motoreductor del sistema de dosificación de degradaciones	316.25	2,016.00	2,332.25
4	Adecuación del área superior de la estructura del sensor inductivo	161.00	-	161.00
			sub-total (\$)	4,206.75
Propuestas preventivas				
1	Procedimiento para el apagado seguro del NDT	70.50	-	70.50
2	Estándar de inspección para el contacto de las ruedas del rotopulser y el tubo en línea	28.00	-	0 28.00
3	Remplazar el eje actual y realizar modificaciones al nuevo eje	1,300.00	18,192.00	19,492.00
4	Estándar de inspección para mantener el sensor en la posición adecuada	28.00	-	28.00
5	Reducir el borde superior de las cajas de rodillos imantados	161.00	-	161.00
			sub-total (\$)	19,779.50
Propuestas de mejora				
1	Cuna de clasificación de degradaciones	5,085.00	76,571.97	81,656.97
2	Herramienta para la medición de longitud del tubo	118.50	3,022.06	3,140.56
3	Guarda protectora en el área de inspección	147.00	4,183.70	4,330.70
			sub-total (\$)	89,128.24
	Otros costos			5.000
			TOTAL (\$)	113,714.49

Por otra parte, el beneficio cuantitativo, es establecido como el ahorro potencial que se percibe por no presentar las paradas de línea para recoger degradaciones luego de haberse implementado las propuestas. Para el estudio, se tienen 511,05 min/mes, aproximadamente, asociados a recoger degradaciones mientras que, el costo de parada de esta laminadora, es de 602,69 \$/min, por lo que, el ahorro potencial corresponde a 308.004,07 \$/mes.

La evaluación de la factibilidad de la propuesta global, se realizó a través del tiempo de recuperación de la inversión (TRI), tomando para ello el costo total de la misma, entre el beneficio percibido como el ahorro mensual calculado anteriormente.

$TRI = (\text{Costo de la inversión}(\$)) / (\text{Beneficio}(\$/(\text{unidad de tiempo})))$

$= (113.714,49 \$) / (308.004,07 \$/\text{mes}) = 0,3672$ meses ≈ 11 días

Siendo el TRI considerablemente corto y además de considerar que, del monto total de inversión, solo el 2,3% fue gastado efectivamente por la empresa y el otro, 97,7% es costo de oportunidad, la empresa clasificó la propuesta global como factible económicamente por lo que, se procede a la fase de ejecución del proyecto mediante la implementación de todas las propuestas.

Establecimiento del orden de ejecución de las propuestas a través del puntaje ICE

Para la aplicación del puntaje ICE (Impacto – Costo – Facilidad) mostrado en la tabla 5, se tomó en consideración, la clasificación de cada propuesta, es decir, las propuestas correctivas tienen mayor peso que las preventivas, y éstas a su vez, tienen mayor peso que las de mejora.

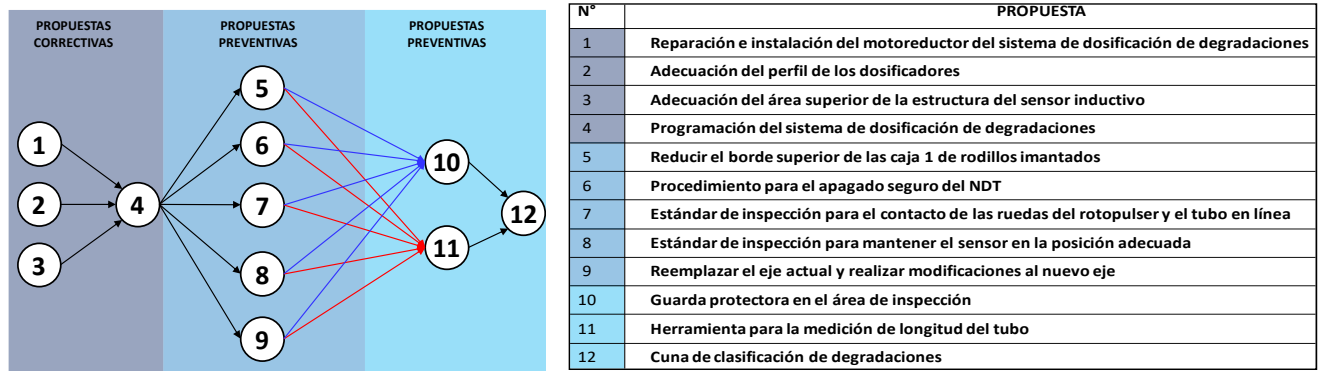
Tabla 5. *Aplicación del puntaje ICE*

	Actividad	I	C	E	Prioridad
Propuestas correctivas	Adecuación del perfil de los dosificadores	5	5	5	125
	Programación del sistema de dosificación de degradaciones	5	5	3	75
	Reparación e instalación del motoreductor del sistema de dosificación de degradaciones	5	5	5	125
	Adecuación del área superior de la estructura del sensor inductivo	5	5	5	125
Propuestas preventivas	Procedimiento para el apagado seguro del NDT	3	5	5	75
	Estándar de inspección para el contacto de las ruedas del rotopulser y el tubo en línea	3	5	5	75
	Remplazar el eje actual y realizar modificaciones al nuevo eje	5	1	3	15
	Estándar de inspección para mantener el sensor en la posición adecuada	3	5	5	75
	Reducir el borde superior de las cajas de rodillos imantados	3	5	5	75
Propuestas de mejora	Guarda protectora en el área de inspección	1	3	5	15
	Cuna de clasificación de degradaciones	5	1	3	15
	Herramienta para la medición de longitud del tubo	1	3	5	15

Tomando en consideración los resultados del puntaje ICE, se realizó un diagrama de precedencia (figura N° 4), para organizar la

secuencia a seguir para la ejecución de las propuestas.

Figura 4. Diagrama de precedencias para la ejecución de las propuestas



Ejecución de las propuestas

A continuación, se describen las propuestas ejecutadas, en el orden establecido considerando el puntaje ICE, algunas de las cuales se pueden visualizar en la figura 5.

Reparación e instalación del motoreductor del sistema de dosificación de degradaciones

Se creó una solicitud para la reparación del motoreductor. Fue rebobinado y se instaló en el área correspondiente, así como también, fue verificado su funcionamiento mediante el accionamiento forzado del motor.

Adecuación del perfil de los dosificadores

La reducción del perfil de los dosificadores hasta la dimensión propuesta, para la cual, se evita la posibilidad de colisión de los tubos contra los dosificadores y, por tanto, contra la estructura.

Adecuación del área superior de la estructura del sensor inductivo

Para realizar la dosificación del tubo de forma estable, fue necesario reducir la parte superior de la guarda protectora del sensor, a fin de evitar cualquier posibilidad de que el tubo degradado no pudiese ser dosificado de la línea de producción.

Programación del sistema de dosificación de degradaciones

Para obtener la programación final del sistema de dosificación de degradaciones (figura 8) basado en el flujograma para la programación eléctrica propuesta, fue necesario ejecutar la prueba para la determinación de pulsos a la salida de la cortadora la cual fue realizada con un producto de 3 x 1" 1.10 para un rango de velocidades entre 80 – 130 m/min y una variación de: 100, 950, 450 y 200 pulsos, ante lo cual, la expulsión de los tubos fue satisfactoria. Como conclusión, el punto de dosificación de las degradaciones a la salida de la cortadora es de 200 pulsos (20 cm).

Figura 5. Ejecución de las Propuestas



Reparación e
instalación del
motoreductor



Reducción del
perfil de los
dosificadores



Establecimiento de la
programación del
sistema



Dosificación continua de las degradaciones
con la programación diseñada

Reducción del borde superior de la caja N° 1 de rodillos imantados

Con la finalidad de evitar cualquier posibilidad de que el tubo no sea dosificado de la línea, se eliminó el borde superior de la guarda N° 1 de rodillos, ya que, el extremo del tubo al ser dosificado estaba muy cercano al borde de la caja de rodillos. Procedimiento para el apagado seguro del equipo NDT

El procedimiento diseñado, ha sido aprobado por el supervisor de la línea y el mismo, se encuentra ubicado en las cercanías de la laminadora a modo de consulta e instrucción para los operadores. La capacitación para la aplicación del mismo, fue realizada mediante lecciones puntuales.

Estándar de inspección para el contacto de las ruedas del rotopulser y el tubo en línea
Diariamente, este estándar de inspección es aplicado para la prevención ante cualquier irregularidad con respecto al contacto de las ruedas del rotopulser y el tubo en línea. La capacitación para la aplicación, fue realizada mediante la exposición de lecciones puntuales.

Estándar de inspección para mantener el sensor en la posición adecuada

Este estándar es aplicado por el operador según la frecuencia indicada en el mismo. La capacitación para la aplicación del mismo, fue realizada mediante la exposición de lecciones puntuales.

Reemplazar el eje actual y realizar modificaciones al eje

Se creó un nuevo eje que presenta condiciones adecuadas para el correcto funcionamiento (rectitud) y, además, de longitud mayor para alejar el motor del área de dosificación y proteger este sub-equipos contra cualquier eventualidad.

Guarda protectora en el área de inspección
Se creó la guarda protectora a la salida de la cortadora para resguardar al inspector de calidad en su área de trabajo. Dicha guarda está adjunta a la cortadora y las dimensiones fueron diseñadas a modo de que permita la dosificación del tubo sin posibilidad de choque contra la guarda.

Herramienta para la medición de la longitud del tubo

Como acción de mejora se realizó una herramienta para la medición del tubo,

para facilitar esta operación en la mesa de degradaciones. Esta herramienta posee como referencia la longitud de 6 metros, ante lo cual, para cualquier variación de longitud del tubo podrá ser registrada fácilmente.

Cuna de clasificación de degradaciones

Habiéndose presentado esta oportunidad de mejora, se realizó un sistema clasificatorio para las degradaciones.

Cuantificación de los resultados obtenidos

Para la cuantificación de los resultados obtenidos por la implementación del sistema “cero fallas” diseñado, se tomó como referencia un mes de operaciones siguientes a la implementación de las propuestas. Si bien se presentaron paradas en la laminadora 09, ninguna estuvo asociada a fallas en el sistema de dosificación de degradaciones. El porcentaje de paradas para recoger degradaciones es de 0% y el MTBI (Tiempo Medio Entre Interrupciones) no aplica debido a que la línea, no es detenida por esta causa.

Además de cumplir exitosamente con las metas en los indicadores, se presenta una mejoría en la liberación de las órdenes de producción por la clasificación inmediata de las degradaciones en el área de dosificación. Anteriormente, dichas órdenes tenían un tiempo promedio de

cierre de 1-2 semanas. Por otra parte, se tiene un aumento en la productividad del 14,721% debido a que, para una tubería de 2x1"0,90 se trabajó a su velocidad estándar de 150 m/min, lo cual se logró gracias a la resolución de la problemática objeto de esta investigación, ya que, anteriormente, cuando se estaba dosificando por el área sur de la laminadora (cuna “A” adjunta al empaquetado de 1era calidad), como la dosificación era manual y la velocidad de la línea era muy alta para la capacidad visual de una persona, se había modificado el estándar a 120 m/min.

Acciones de estandarización

Al haberse automatizado la clasificación de degradaciones, se tuvo la necesidad de realizar el instructivo operativo para la clasificación de la tubería de degradación en las cunas correspondientes en la laminadora 09 (manual MAN-O-209). Por otra parte, se creó un manual de uso en el que se especifican los aspectos técnicos y operativos del sistema de dosificación de degradaciones, incluyendo el sistema clasificatorio. De igual forma, se realizaron y dictaron dieciséis lecciones puntuales que muestran puntos o temas clave en aspectos de seguridad, conocimientos básicos, mejoras y fallas relacionadas al sistema de dosificación y clasificación de degradaciones.

CONCLUSIONES

La investigación demuestra que la transición hacia un sistema de "cero fallas" en la dosificación de degradaciones no depende únicamente de la reparación de componentes aislados, sino de un rediseño estructural profundo fundamentado en la metodología Kobetsu Kaizen. Al corregir la sincronización de la línea mediante la integración del equipo rotopulser, se logró desacoplar la eficacia del sistema de la variabilidad de la velocidad de laminación, eliminando el 26,405% de las paradas que anteriormente se atribuían a fallas de diseño. El éxito rotundo del proyecto, evidenciado en la erradicación total de la recolección manual y un aumento del 14,72% en la productividad, valida que el enfoque de Manufactura de Clase Mundial transforma las ineficiencias crónicas en activos de alta rentabilidad, logrando un retorno de inversión en un tiempo récord de apenas 11 días.

Este despliegue técnico encontró su soporte estratégico en la Fase IV, donde la aplicación del puntaje ICE (Impacto, Costo, Facilidad) y el diagrama de precedencias permitieron una jerarquización lógica de las intervenciones. Esta articulación metodológica garantizó que las propuestas de mejora se ejecutaran bajo criterios

estrictos de factibilidad económica y técnica, asegurando que la secuencia de implementación respetara las dependencias críticas de la laminadora y optimizara los recursos de la organización. Al vincular la prioridad de las acciones con la realidad operativa de la planta, se construyó una ruta de ejecución coherente que evitó improvisaciones y permitió una transición fluida hacia el nuevo sistema de dosificación automatizado.

Finalmente, se concluye que la sostenibilidad de la mejora alcanzada reside en el robusto proceso de estandarización y entrenamiento implementado tras la ejecución de las propuestas. La creación de instructivos de Prácticas Seguras de Operación (PSO), manuales de uso y lecciones puntuales (LUP) asegura que el conocimiento técnico generado sea transferible y que las condiciones de "cero fallas" se mantengan a largo plazo. Esta gestión integral de la seguridad y el conocimiento no solo protege la integridad física de los operadores al delimitar el contacto seguro con la línea mediante guardas protectoras, sino que consolida una cultura de excelencia operativa alineada con las metas de certificación de Manufactura de Clase Mundial.

REFERENCIAS

- Alvarez Divizzia, L. (2021). *Incremento de eficiencia operacional en la línea de envasado tomate en Molitalia utilizando la metodología Kobetsu-Kaizen*. [Trabajo de suficiencia profesional para optar el título de Ingeniero Industrial, Universidad San Ignacio de Loyola]. <https://hdl.handle.net/20.500.14005/13100>
- Bernal Forero, W. P., y Parra Cárdenas, E. L. (2020). Plan de aplicación del TPM para los equipos y herramientas de la planta de fabricación y ensamblaje de vehículos de Niko Racing Colombia [Trabajo de especialización, Universidad ECCI]. Repositorio Institucional ECCI. <https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/713>
- Corporación Cto L Excelencia Operacional de Arcelormittal (2011). *E6.01 Version*.
- Diego-Mas, J. A. (2015). *Evaluación de la carga postural mediante el método REBA*. Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia.
- Gonzales Inga, J. M., y Morales Cuadros, K. J. (2021). *Propuesta de mejora en la gestión del mantenimiento preventivo para incrementar la eficiencia de la línea de producción de envases de hojalata en una empresa metalmecánica*. [Tesis de título profesional, Universidad San Ignacio de Loyola]. <https://repositorio.usil.edu.pe/server/api/core/bitstreams/4a5a44e2-4552-418b-abb0-9debf1ea6ba9/content>
- Haider, M. M. N., y Rafiquzzaman, M. (2023). Implementation of Total Productive Maintenance in a jute bag industry: A case study. *Journal of Engineering Science*, 14(1), 137-149. <https://doi.org/10.3329/jes.v14i1.67642>
- Industrias Unicon, C.A. (2015). *Manual de Manufactura de Clase Mundial*. Venezuela.
- Kumar, P., Chauhan, P., Chaudhary, R., y Juneja, D. (2017). Implementation of 5S and Kobetsu Kaizen (TPM Pillar) in a manufacturing organization. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(7), 2987-2991. <https://www.irjet.net/archives/V4/i7/IRJET-V4I7603.pdf>
- Kumar, R., Singh, K., y Jain, S. K. (2022). Setup time reduction to enhance the agility of the manufacturing industry through kobetsu kaizen and SMED: A case study. *International Journal of Process Management and Benchmarking*, 12(5), 631-656. <https://doi.org/10.1504/IJPMB.2022.125320>
- Martínez Fuentes, M., y Vivas Escalante, A. (2022). *Guía de Modalidad de Proyecto Factible: etapas, propuesta, ejecución y evaluación*. Universidad Miguel de Cervantes.
- Raj, M., Swaroop, S., Kumar, S., Bhushan, R., Kumar, V., y Borkar, M. G. (2017). Kobetsu Kaizen Losses Analysis to Enhance the Overall Plant Effectiveness in Steel Manufacturing Industry—A Case Study at JSPL, Raigarh. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(12), 245-251. <https://www.irjet.net/archives/V4/i12/IRJET-V4I1245.pdf>
- Raj, M., Bhushan, R., Prakash, K. V. K. S., Pandey, V., Raju, B. A., y Borkar, M. (2021). Embellishing TPM through Losses Analysis to Enhance Overall Plant Effectiveness in Ferro Alloys Plant- A Case Study at JSPL, Raigarh. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(3), 840-847. <https://www.irjet.net/archives/V8/i3/IRJET-V8I3179.pdf>
- Rifqi, H., Zamma, A., Souda, S. B., y Hansali, M. (2021). Lean manufacturing implementation through DMAIC approach: A case study in the automotive industry. *Quality Innovation Prosperity*, 25(2), 54-77. <https://doi.org/10.12776/qip.v25i2.1576>

Sandeep, S., Kumar, M., y Upadhyay, H. (2023). A tactical perspective to reduce major losses in manufacturing sector through Total Productive Maintenance technique. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 4(9), 2820–2839.

<https://ijrpr.com/uploads/V4ISSUE9/IJRPR17453.pdf>

Singh, A. P., y Fentaw, N. (2023). Relationship between TPM practices and operational performance in soft drinks manufacturing industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 29(4), 729–762.

<https://doi.org/10.1108/JQME-10-2022-0067>

Surya, A., Kumar, R., y Trehan, R. (2024). Application of lean manufacturing using Kaizen analysis: A case study. *Journal of Graphic Era University*, 12(1), 125–146.

<https://doi.org/10.13052/jgeu0975-1416.1218>

UPEL (2016). *Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales*. 5^{ta} Edición. Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador.

Wolska, M., Gorewoda, T., Roszak, M., y Gajda, L. (2023). Implementation and Improvement of the Total Productive Maintenance Concept in an Organization. *Encyclopedia*, 3(4), 1537–1564.

<https://doi.org/10.3390/encyclopedia3040110>

Autores

Kimberly Dayana Colls Romero. Ingeniero Industrial, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9091-9978>

Email: collskimb@gmail.com

Jesús Alberto Rangel Pérez. Ingeniero Industrial, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7026-7225>

Email: rangelpja@gmail.com

Jadlyn Nirosky González de Urquiola. Ingeniero Industrial, Universidad de Carabobo; Magister en Ingeniería Ambiental, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6273-6404>

Email: jadlyng@gmail.com

Recibido: 09-03-2025

Aceptado: 19-11-2025

Artículos de Divulgación

**TEMAS DE
INTERÉS GENERAL**

Uso de redes neuronales artificiales para problemas de programación entera

Using artificial neural networks for integer programming problems

Julián Silva Rodríguez, Andrés Fernández Rosas

Palabras clave: investigación de operaciones, programación lineal entera, redes neuronales artificiales

Key words: operations research, integer linear programming, artificial neural networks

RESUMEN

En la investigación de operaciones, la resolución eficiente de modelos de programación entera representa un desafío computacional complejo debido a su naturaleza combinatoria. Ante las limitaciones de los métodos exactos, las redes neuronales artificiales emergen como un paradigma disruptivo capaz de optimizar decisiones algorítmicas mediante el aprendizaje de patrones estructurales. Este artículo presenta una propuesta metodológica para integrar redes neuronales artificiales en la solución de problemas de programación entera, con énfasis en programación lineal entera mixta. Se realizó una revisión de literatura (2016–2025) en Scopus y ScienceDirect para identificar enfoques que combinan aprendizaje automático con solucionadores exactos (branch-and-bound y branch-and-cut). La evidencia reciente reporta mejoras frente a heurísticas tradicionales en componentes críticos como ramificación, heurísticas primales y selección de nodo/variable. Con base en esta síntesis, se propone un esquema de representación del programación lineal entera mixta como grafo bipartito y un protocolo de evaluación centrado en tiempo de solución, tamaño del árbol y brecha primal–dual, demostrando ventajas comparativas en familias de instancias homogéneas.

ABSTRACT

In operations research, the efficient resolution of integer programming models represents a complex computational challenge due to its combinatorial nature. Given the limitations of exact methods, artificial neural networks emerge as a disruptive paradigm capable of optimizing algorithmic decisions through the learning of structural patterns. This article presents a methodological proposal to integrate artificial neural networks in the solution of integer programming problems, with an emphasis on mixed-integer linear programming. A literature review (2016–2025) was conducted in Scopus and ScienceDirect to identify approaches that combine machine learning with exact solvers (branch-and-bound and branch-and-cut). Recent evidence reports improvements over traditional heuristics in critical components such as branching, primal heuristics, and node/variable selection. Based on this synthesis, a representation scheme of mixed-integer linear programming as a bipartite graph and an evaluation protocol centered on solution time, tree size, and primal–dual gap are proposed, demonstrating comparative advantages in families of homogeneous instances.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las organizaciones operan en entornos de incertidumbre sistémica, caracterizados por una volatilidad donde las variables que inciden en el desempeño institucional resultan cada vez más difíciles de predecir y controlar (World Economic Forum [WEF], 2024). En este contexto, la dinámica competitiva se ve impulsada por fluctuaciones drásticas en la demanda y una evolución acelerada de las necesidades del mercado (Niebel y Freivalds, 2014), factores que se ven potenciados por la disrupción tecnológica y la interconectividad global. En la práctica, estas presiones incrementan la urgencia de implementar modelos de decisión robustos y reproducibles, especialmente en escenarios que requieren fundamentar decisiones discretas —de naturaleza binaria o entera— a nivel táctico y estratégico (Scavuzzo et al., 2024).

Debido a lo anterior, las organizaciones han fortalecido estrategias de mejora basadas en el análisis de procesos operativos y administrativos, con el fin de aumentar competitividad y rentabilidad (Sánchez et al., 2019). En problemas de decisión complejos, dichas estrategias suelen traducirse en modelos de optimización que integran restricciones reales —capacidad, presupuesto, normatividad— y decisiones discretas (Zhang et al., 2023). Una herramienta central para soportar decisiones óptimas es la Investigación de Operaciones (IO). Por medio de modelos como programación lineal (PL), programación entera (PE) y programación

lineal entera mixta (PLEM, —*MILP*, *Mixed-Integer Linear Programming*—, se pueden obtener soluciones óptimas o certificadas para procesos de producción, logística, finanzas y planificación, entre otros (Ortiz y Caro, 2017; Scavuzzo et al., 2024).

La PE es particularmente útil cuando las variables representan decisiones discretas (seleccionar/no seleccionar, abrir/cerrar, asignar/no asignar). En términos computacionales, la PE y la PLEM son NP-difíciles —*non-deterministic polynomial-time hard*, comúnmente abreviado como *NP-hard*— y típicamente se resuelven con algoritmos de ramificación y acotamiento —*branch-and-bound*— y ramificación y corte —*branch-and-cut*—, los cuales suelen apoyarse en heurísticas para agilizar la búsqueda de soluciones en tiempos razonables (Deza y Khalil, 2023; Scavuzzo et al., 2024). Esto abre un espacio natural para que el aprendizaje automático construya heurísticas basadas en datos, complementando —no reemplazando— los métodos exactos (Bengio et al., 2021).

La PE optimiza una función objetivo bajo restricciones lineales, exigiendo que algunas o todas las variables tomen valores enteros. Su relevancia radica en que muchas decisiones reales son discretas —por ejemplo, selección de proyectos, localización, asignación, rutas—, y la formulación entera permite modelarlas de forma transparente y verificable (Zhang et al., 2023; Scavuzzo et al., 2024).

Por otra parte, las redes neuronales artificiales (RNA) son modelos de

aprendizaje que aproximan funciones complejas a partir de datos. En optimización combinatoria, las RNA se han usado para aprender componentes decisionales de los solucionadores —ramificación, selección de cortes, heurísticas primales—, explotando regularidades en distribuciones de instancias y reduciendo tiempos de cómputo en escenarios repetitivos (Bengio et al., 2021; Scavuzzo et al., 2024).

De acuerdo con lo anterior, este artículo tiene como objetivo proponer, con base en evidencia reciente, un marco metodológico para representar y resolver problemas de PE mediante RNA integradas a un solucionador exacto, y establecer criterios comparativos —tiempo, tamaño del árbol,

brecha primal-dual— frente a métodos tradicionales y enfoques alternativos.

En consecuencia, el presente artículo consolida la literatura reciente sobre aprendizaje para programación entera y propone una aproximación conceptual para representar modelos de PE mediante una arquitectura de RNA, orientada a mejorar decisiones internas del solucionador —por ejemplo, ramificación y construcción de soluciones primales— y no únicamente a “predecir” una solución final. El aporte se complementa con un esquema de validación comparativa frente a heurísticas clásicas y enfoques de referencia reportados en la literatura (Gasse et al., 2019; Nair et al., 2021; Du et al., 2025).

Marco Teórico

Investigación de operaciones

El uso de la Investigación de operaciones para la toma de decisiones en las empresas, ha venido aumentando con el tiempo, apoyando a las organizaciones en la búsqueda de soluciones óptimas para los problemas organizacionales, teniendo en cuenta con los recursos y capacidad con la que cuentan. En consecuencia, la investigación de operaciones ofrece la opción de que por medio de modelos matemáticos se represente el comportamiento de un sistema y se logren tomar decisiones (Winston y Goldberg, 2005).

Varios autores han centrado sus esfuerzos en lograr definiciones de la investigación de operaciones y como aporta a la toma de

decisiones de las organizaciones. Autores como Taha (2024), Prawda (2004), Hillier y Lieberman (2020) coinciden en afirmar que la Investigación de Operaciones es una disciplina o una rama de las matemáticas que por medio del uso de métodos y herramientas analíticas y cuantitativos, realiza investigación aplicando el método científico a los diferentes problemas o escenarios de las organizaciones, con el objetivo de lograr soluciones óptimas, teniendo en cuenta las limitaciones que se pueden tener en los recursos que intervienen en el funcionamiento normal de una organización.

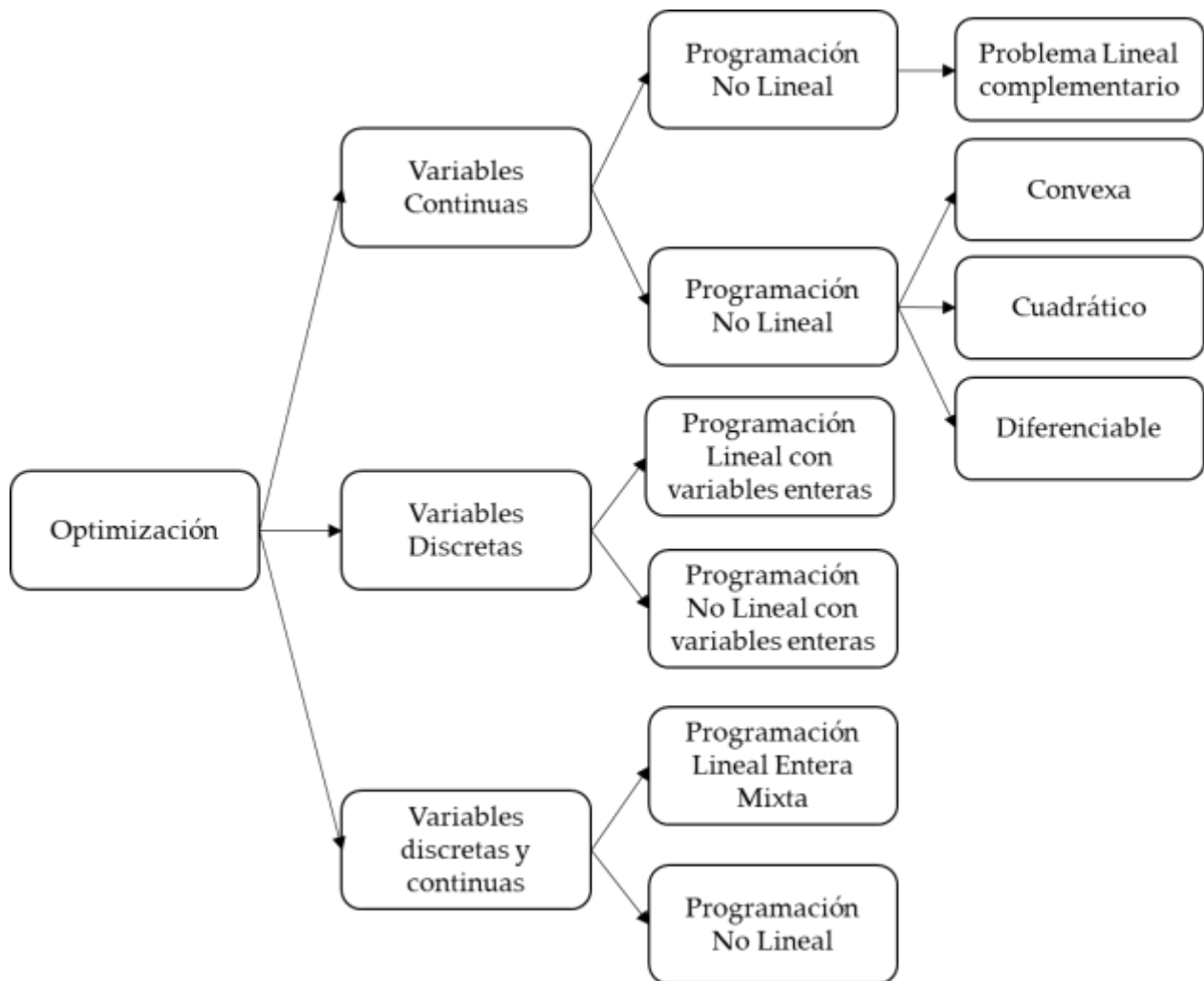
La investigación de operaciones utiliza modelos de optimización, los cuales se pueden clasificar inicialmente en los métodos clásicos, los cuales son aquellos

que buscar encontrar soluciones optimas donde podemos entrar herramientas como programación lineal, programación entera, programación entera mixta, programación estocástica y programación dinámica. En segunda instancia podemos encontrar los métodos heurísticos y metaheurísticos, cuyo objetivo son encontrar soluciones factibles o globales, dentro de estos métodos se pueden encontrar herramientas como agente viajero, problema del cartero

chino, búsqueda tabú, colonia de hormigas, entre otros (Linares et al., 2001).

Según Pérez Peña (2019), los modelos de optimización se pueden clasificar también de acuerdo con el tipo de variables que se manejen, lo cual podría ser variables continuas, variables discretas y modelos que funcionan para los dos tipos de variables. En la figura 1 se puede observar dicha clasificación.

Figura 1. Clasificación modelos de optimización



Nota. Adaptado de *Introducción a los modelos de optimización*, por R. Pérez Peña, 2019, UniPíloto.

Dentro de las herramientas de la investigación de operaciones se encuentra la programación entera, que permite formular decisiones discretas mediante variables enteras y restricciones lineales. En su forma más usada, la PLEM combina variables continuas e enteras, lo que amplía su aplicabilidad industrial —por ejemplo, planeación, asignación, ruteo, scheduling—. Debido a su complejidad (NP-dificultad), los solucionadores modernos se basan en *branch-and-bound/branch-and-cut* y en múltiples

heurísticas cuyo diseño es, en buena medida, empírico (Zhang et al., 2023; Scavuzzo et al., 2024).

A modo de ejemplo, una de las posibles aplicaciones de la PE es la decisión de si invertir o no en un proyecto, donde las decisiones se representan por medio de variables binarias. En la figura 2, se observa un ejemplo de tomar este tipo de decisiones donde la función objetivo está dada en la maximización de las ganancias y las restricciones se plantean en torno a los fondos posibles.

Figura 2. Ejemplo modelo Programación Entera

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{si se selecciona el proyecto } j \\ 0, & \text{si no se selecciona el proyecto } j \end{cases}$$

El modelo de PLE es

$$\text{Maximizar } z = 20x_1 + 40x_2 + 20x_3 + 15x_4 + 30x_5$$

Sujeto a

$$5x_1 + 4x_2 + 3x_3 + 7x_4 + 8x_5 \leq 25$$

$$x_1 + 7x_2 + 9x_3 + 4x_4 + 6x_5 \leq 25$$

$$8x_1 + 10x_2 + 2x_3 + x_4 + 10x_5 \leq 25$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 = (0, 1)$$

Nota. Tomado de *Investigación de operaciones* (11.^a ed.), por H. A. Taha, 2024, Pearson.

Como se mencionaba anteriormente, la programación entera se puede dividir en programación entera pura y programación entera mixta. Algunas aplicaciones de la programación entera pura son:

Problema de asignación: en este problema se busca asignar una cantidad de recursos limitados para realizar diferentes

funciones, lo cual considera que dichos recursos no son fraccionables. Los ejemplos más típicos en este tipo de problema es la asignación de personal a cierta cantidad de cargos, asignación de profesionales a una cantidad de proyectos o tareas, entre otros (González Ariza y García Llinás, 2015)

Problema de la mochila: este problema también conocido como Knapsack Problem, hace referencia a un problema cotidiano donde un viajero o un excursionista debe preparar su maleta o su mochila, donde tiene unas posibilidades de elementos a cargar, pero hay que tener en cuenta que la maleta tiene una capacidad de carga. El objetivo final del problema es escoger los elementos a cargar que maximice la utilización de la capacidad de carga y el mayor número de elementos posibles (Silva y Torres, 2014).

Problema de Planificación Forestal: este problema esta directamente relacionado no con decisiones de si o no, si no hace referencia a la planeación de talas de árboles y planificación de números de trabajadores que se necesitan. También incluye variables referentes a inventarios, compras y contratación y despido de trabajadores. Todas las variables inmersas en este problema son enteras (Vargas Suárez, et al., 2004).

Igualmente existen diversas aplicaciones en la programación entera mixta, las cuales pueden ser:

Problema de localización y transporte: en los problemas clásicos de transporte donde las variables hacen referencia a cantidades a transportar las cuales pueden ser discretas o continuas, donde puede haber una variación frente la incursión de variables binarias con el fin de decidir la apertura de plantas de producción, centros de distribución o cualquier localización que necesite una empresa, donde las decisiones son de si abrir o no una localización (Salas, 2009)

Problema de incursión de costos fijos: esta aplicación se da en escenarios donde se asumen costos fijos por utilización de servicios como puede ser luz, agua, gas, teléfono, etc, donde el consumidor debe asumir un costo fijo independiente de la cantidad que consuma y por ende el modelo debe sumar este costo al tomar la decisión de si toma el servicio o no (Hillier y Lieberman, 2020).

Redes Neuronales Artificiales

La teoría de las redes neuronales tiene como antecedente el estudio del sistema nervioso y, en su versión moderna, se consolida como un enfoque de aprendizaje profundo para aproximación de funciones y toma de decisiones a partir de datos. En optimización, el interés no es “imitar el cerebro”, sino aprender reglas de decisión que sustituyan o complementen heurísticas manuales (Bengio et al., 2021).

En consecuencia, las RNA se implementan como capas de neuronas artificiales conectadas por pesos, que se ajustan mediante entrenamiento para minimizar una función de pérdida. Para problemas de PE, la representación como grafo (variables–restricciones) ha sido especialmente efectiva porque preserva estructura y permite generalización a instancias de distinto tamaño (Gasse et al., 2019; Du et al., 2025).

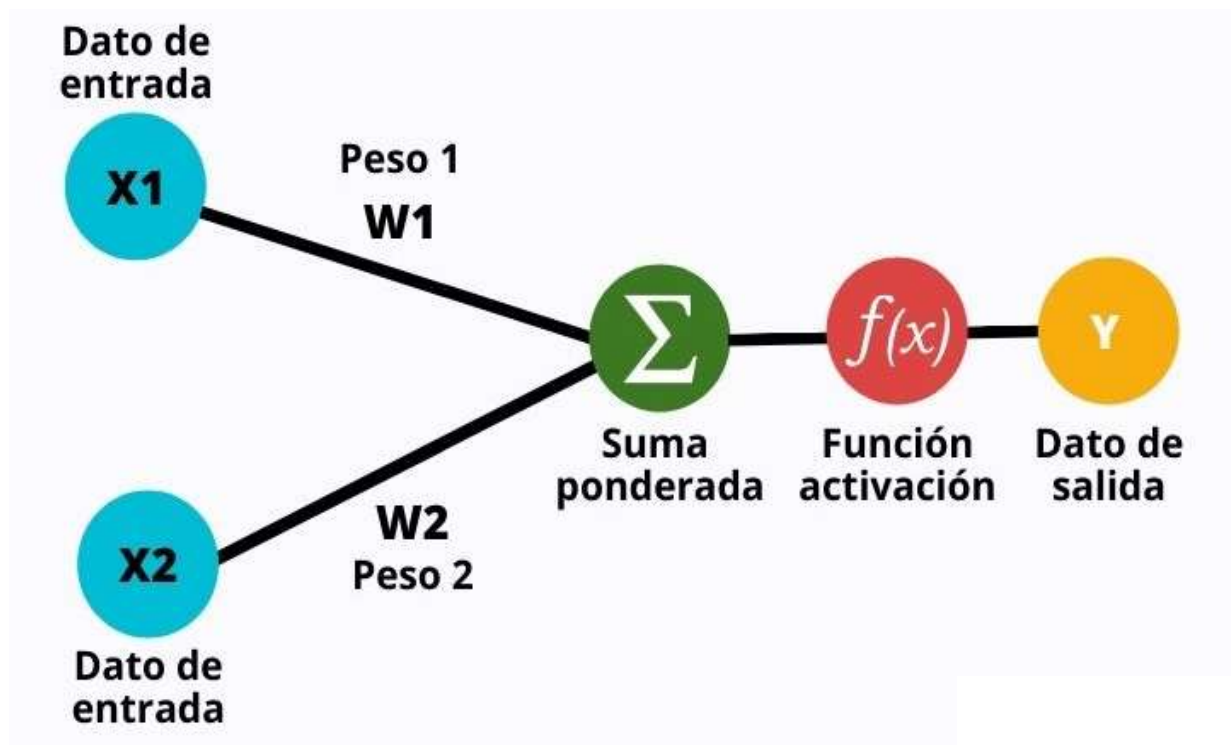
Los componentes de procesamiento en las RNA incluyen: entradas —*features*—, pesos, funciones de activación y una regla de actualización —por ejemplo, Adam—. En el contexto de PE, las salidas típicas no son necesariamente una solución completa,

sino decisiones internas del solucionador: elegir la variable de ramificación, ordenar nodos, seleccionar cortes o proponer asignaciones parciales (Deza y Khalil, 2023; Scavuzzo et al., 2024).

El perceptrón es el bloque conceptual básico, pero en aplicaciones modernas se utilizan arquitecturas profundas (PLEM,

GNN, *transformers*) según la estructura del dato. Para PE/PLEM, la evidencia reciente favorece modelos basados en grafos por su alineación natural con la matriz de restricciones y su desempeño al aprender políticas de ramificación y otras heurísticas (Gasse et al., 2019; Gupta et al., 2020).

Figura 3. Estructura de un perceptrón



Nota. Tomado de *Las redes neuronales artificiales*, por R. F. López y J. M. F. Fernández, 2008, Netbiblo.

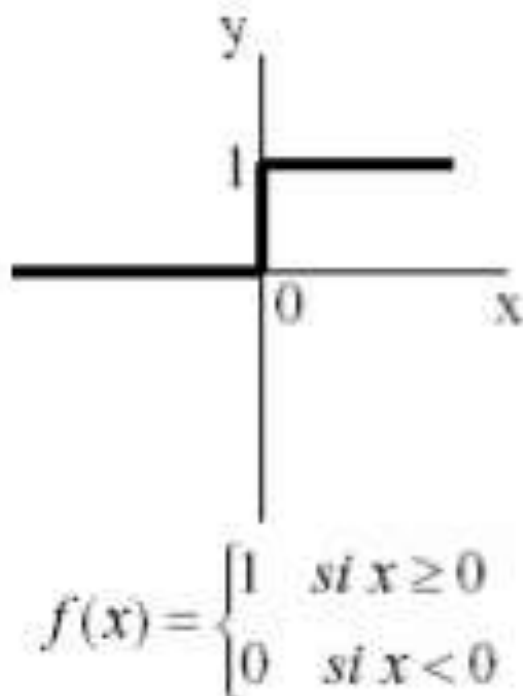
En la estructura del perceptrón los X_i representan los valores de entradas o las capas de entrada, las cuales se pueden considerar como características de las clases que se pretender clasificar, W_i son los pesos porcentuales de entradas que son

multiplicados posteriormente con los datos de entrada.

Las funciones de activación permiten a la red neuronal controlar el proceso de aprendizaje. Según López y Fernández (2008), dentro de las funciones de activación se pueden encontrar:

Función escalón: con esta función se logra el envío de señales de salida o respuestas binarias de 1 o 0 y el valor que tome dependerá de superar cierto valor parametrizado (ver figura 4)

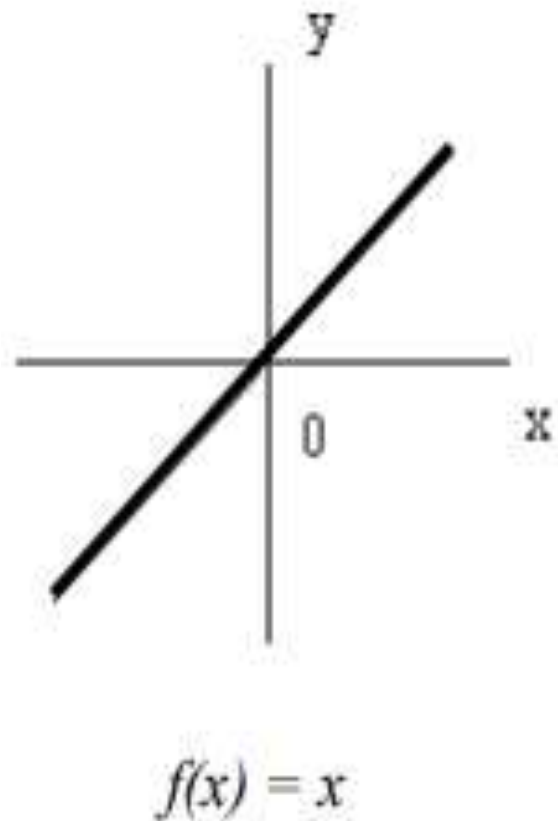
Figura 4. Función escalón



Nota. Tomado de *Las redes neuronales artificiales*, por R. F. López y J. M. F. Fernández, 2008, Netbiblo.

Función lineal: esta función en realidad es una identidad de las variables de entrada y equivaldría a la misma variable de salida. (ver figura 5)

Figura 5. Función lineal

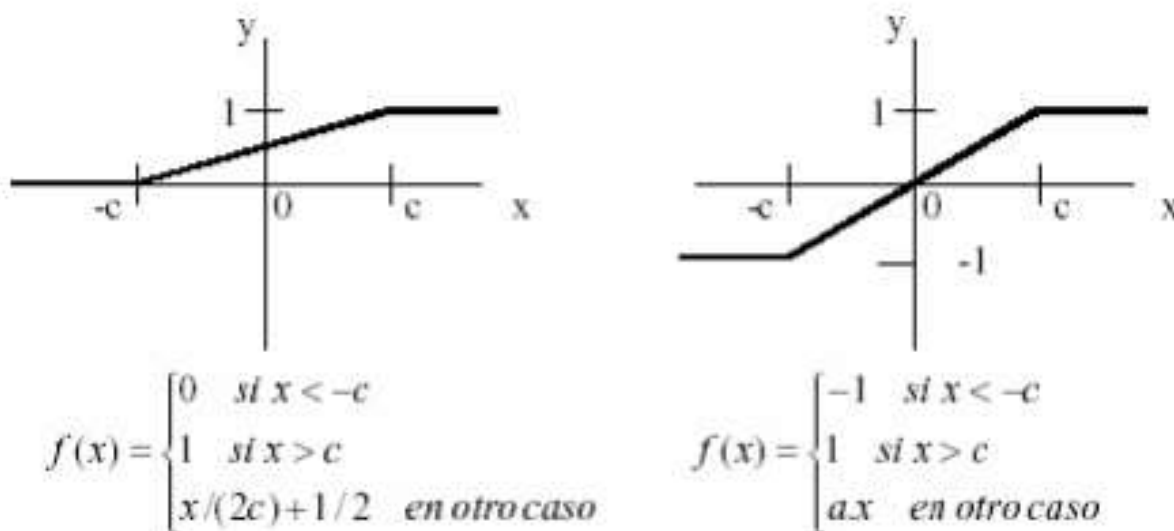


Nota. Tomado de *Las redes neuronales artificiales*, por R. F. López y J. M. F. Fernández, 2008, Netbiblo.

Función mixta: esta función combina las dos anteriores, donde si la activación es menor a un parámetro la salida o resultado es 0 pero si es mayor la salida es 1 y si la activación esta entre los límites de los parámetros va a tomar valores de acuerdo con una función lineal (ver figura 6).

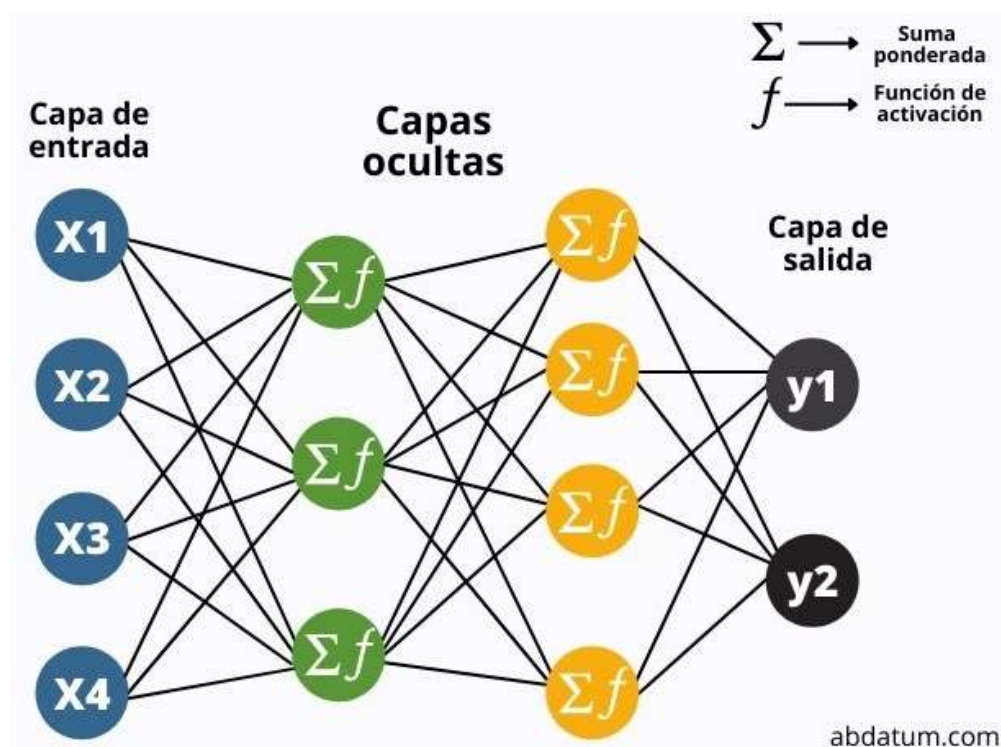
Finalmente se puede decir que una red neuronal es la combinación de varios perceptrones. En la figura 7 se puede observar la estructura de la red neuronal artificial.

Figura 6. Función mixta



Nota. Tomado de *Las redes neuronales artificiales*, por R. F. López y J. M. F. Fernández, 2008, Netbiblo.

Figura 7. Estructura red neuronal artificial



Nota. Tomado de *Las redes neuronales artificiales*, por R. F. López y J. M. F. Fernández, 2008, Netbiblo.

METODOLOGÍA

La metodología se estructuró en dos frentes: (i) revisión de literatura para identificar enfoques de RNA aplicados a PE/PLEM y (ii) síntesis metodológica para construir la propuesta.

Revisión: se consultaron Scopus y ScienceDirect (periodo 2016–2025) con combinaciones de palabras clave: “*mixed-integer programming*”, “*integer programming*”, “*branch-and-bound*”, “*branch-and-cut*”, “*neural network*”, “*graph neural network*”, “*learning to branch*”, “*cut selection*”, “*neural diving*”. Se aplicaron criterios de inclusión: (a) artículo revisado por pares o preprint ampliamente citado; (b) evaluación empírica contra un solver base —por ejemplo, SCIP— o heurísticas estándar; (c) descripción reproducible del método. Se excluyeron trabajos sin comparación o sin métricas de desempeño. **Síntesis:** los aportes se organizaron por tarea dentro del solver (ramificación,

heurísticas primales, cortes, selección de nodo/variable, configuración) para derivar un flujo de diseño: representación del problema → generación de datos → arquitectura → entrenamiento (imitación/RL/supervisado) → integración con solver → evaluación.

Con base en la síntesis, la propuesta sigue un enfoque “*solver-in-the-loop*”: la RNA no reemplaza el método exacto, sino que aprende a tomar decisiones locales de alta influencia. Para ello, se recomienda codificar el PLEM como grafo bipartito (variables–restricciones) y entrenar la política a partir de demostraciones —imitación de *strong branching*— o a partir de un Proceso de Decisión de Markov con estructura de árbol —*Tree-Markov Decision Process*, *Tree-MDP*— según la disponibilidad de expertos y datos (Gasse et al., 2019; Etheve et al., 2020; Scavuzzo et al., 2024).

RESULTADOS

Como se ha podido evidenciar, los problemas de programación entera por su estructura pueden representarse mediante RNA; sin embargo, la contribución clave en la literatura reciente es integrar RNA para mejorar decisiones internas de solucionadores exactos. A continuación, se sintetiza evidencia de ventajas reportadas frente a heurísticas tradicionales.

Evidencia empírica (selección de trabajos): (1) Gasse et al. (2019) aprenden una política

de ramificación con GNN —*Graph Neural Networks*— que imita *strong branching*, reduciendo el tamaño del árbol y tiempos en *benchmarks* difíciles. (2) Nair et al. (2021) introducen *Neural Diving* —heurística primal— y *Neural Branching*, reportando mejoras de 2×–10× (y mayores en casos específicos) frente a *SCIP* —*Solving Constraint Integer Programs*— en conjuntos reales y *MIPLIB* —*Mixed Integer Programming Library*—. (3) Deza y Khalil

(2023) muestran que la selección de cortes es un punto crítico y revisan resultados donde *Machine Learning* (ML) mejora la calidad/eficiencia del *branch-and-cut*. (4) Du et al. (2025) proponen una política conjunta de selección de nodo y variable, superando

reglas por defecto de SCIP en tiempo y tamaño del árbol. (5) Scavuzzo et al. (2024) sistematizan métricas, representaciones y buenas prácticas para evaluar ML en *Branch-and-Bound* (ver figura 8).

Figura 8. Estructura modelo de PE

$$\text{MIN O MAX } Z = C_{11}X_{11} + C_{21}X_{21} + C_{31}X_{31} + \dots + C_{ij}X_{ij}$$

s.a.

$$a_{11}X_{11} + a_{12}X_{12} + a_{13}X_{13} + \dots + a_{1j}X_{1j} = b_1$$

$$a_{21}X_{21} + a_{22}X_{22} + a_{23}X_{23} + \dots + a_{2j}X_{2j} = b_2$$

$$a_{11}X_{11} + a_{21}X_{21} + a_{31}X_{31} + \dots + a_{i1}X_{i1} = d_1$$

$$a_{12}X_{12} + a_{22}X_{22} + a_{32}X_{32} + \dots + a_{i2}X_{i2} = d_2$$

$$X_{ij} = [0,1]$$

Los modelos de programación entera podrán tener objetivos de maximización de beneficios, ganancias, rendimientos, entre otros y podrán tener minimización de costos, tiempos, inversión entre otros, donde los C_{ij} representan los coeficientes que acompañan a las variables de acuerdo con el objetivo que se desea lograr. Los parámetros a_{ij} representan los coeficientes que acompañan a las variables en las restricciones los cuales pueden ser inversiones, tiempos, pesos, entre otros o en el modelo de asignación simplemente será el valor de 1. Finalmente, los

parámetros b_i y d_j son condiciones que se deben cumplir en las restricciones.

El modelo anterior presentado se puede representar por medio de matrices y vectores teniendo en cuenta su estructura dentro de la formulación de la siguiente forma (ver figura 9).

Como se puede observar tanto en la primera ecuación como en la segunda se multiplica por la misma matriz de variables, por ende se podrá lograr una formulación general del problema de la siguiente forma (ver figura 10).

Figura 9. Representación Matricial modelo de PE

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2j} & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & b_2 \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & \dots & a_{ij} & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & d_1 \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} & \dots & a_{i2} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & d_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1j} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \dots & X_{2j} \\ X_{i1} & X_{i2} & X_{i3} & \dots & X_{ij} \\ X_{12} & X_{22} & X_{32} & \dots & X_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1j} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \dots & X_{2j} \\ X_{i1} & X_{i2} & X_{i3} & \dots & X_{ij} \\ X_{12} & X_{22} & X_{32} & \dots & X_{i2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & \dots & C_{ij} & 0 & \dots & 0 & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1j} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \dots & X_{2j} \\ X_{i1} & X_{i2} & X_{i3} & \dots & X_{ij} \\ X_{12} & X_{22} & X_{32} & \dots & X_{i2} \end{bmatrix} = [0 \quad \dots \quad 0]$$

Figura 10. Formulación general matricial

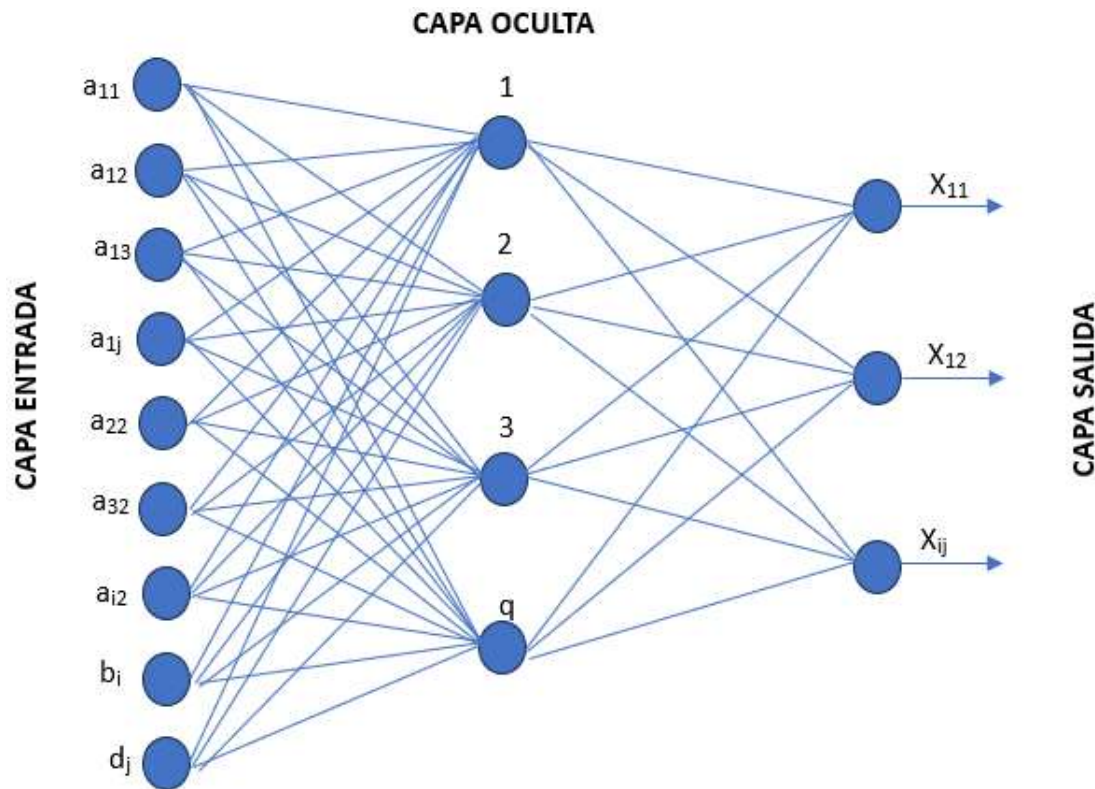
$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2j} & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & b_2 \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & \dots & a_{ij} & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & d_1 \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} & \dots & a_{i2} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & d_2 \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & \dots & C_{ij} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1j} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \dots & X_{2j} \\ X_{i1} & X_{i2} & X_{i3} & \dots & X_{ij} \\ X_{12} & X_{22} & X_{32} & \dots & X_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1j} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \dots & X_{2j} \\ X_{i1} & X_{i2} & X_{i3} & \dots & X_{ij} \\ X_{12} & X_{22} & X_{32} & \dots & X_{i2} \end{bmatrix}$$

Con esta forma general de representar el problema por medio de matrices, se podrá comenzar a diseñar la posible configuración de la red, lo cual define la cantidad de neuronas que se necesitan en la capa de entrada y las salidas que vamos a obtener, que son las variables a las cuales finalmente se les quiere hallar un valor o un resultado óptimo. Los valores de entrada para la red serán todo los coeficientes o parámetros que se tienen definidos en la primera matriz.

En la figura 11 se puede evidenciar la estructura de la red neuronal artificial para

un problema de programación entera. Si bien se ha hecho énfasis en un problema de programación entera tomando como base el modelo de asignación, de igual forma se puede aplicar para cualquier problema de programación entera pura o programación entera mixta, teniendo en cuenta las modificaciones a hacer dependiendo la aplicación.

Finalmente, la red neuronal artificial que representa el modelo de programación entera se podrá implementar y desarrollar en software como R o Python.

Figura 11. Estructura red neuronal artificial para problema de programación entera

Análisis y discusión

Los métodos clásicos (*branch-and-bound/branch-and-cut*) ofrecen optimalidad certificada, pero su desempeño depende de heurísticas y parámetros diseñados manualmente. Las metaheurísticas —por ejemplo, búsqueda tabú, colonia de hormigas— priorizan rapidez y factibilidad, pero no garantizan optimalidad. Las propuestas basadas en RNA se ubican en un punto intermedio: conservan garantías del solver exacto (—si la RNA guía decisiones pero no elimina el árbol— y buscan reducir costo computacional aprendiendo patrones de instancias repetidas (Scavuzzo et al., 2024).

Ventajas reportadas: (i) reducción del tamaño del árbol y del tiempo en

distribuciones específicas; (ii) mejores soluciones primales tempranas (menor brecha primal–dual) a partir de heurísticas aprendidas; (iii) menor dependencia de ajuste manual cuando existe una familia estable de instancias. **Limitaciones:** (a) necesidad de datos y riesgo de no generalizar fuera de la distribución de entrenamiento; (b) costo de entrenamiento e infraestructura; (c) interpretabilidad limitada y sensibilidad a cambios de presolve/configuración (Bengio et al., 2021; Scavuzzo et al., 2024).

En la tabla 1, se presenta un resumen de la idea central, las fortalezas y las limitaciones típicas de cada enfoque.

Tabla 13. Comparación resumen de los enfoques

Enfoque	Idea central	Fortalezas	Limitaciones típicas
Solver exacto (ByB/ByC)	Búsqueda + relajaciones LP + cortes	Optimalidad certificada; robustez	Tiempo elevado; heurísticas manuales
Heurísticas/metaheurísticas	Exploración guiada del espacio	Rapidez; simplicidad	Sin garantía de optimalidad; sensibilidad a parámetros
RNA dentro del solver	Aprender decisiones (ramificación, cortes, heurística primal)	Acelera tareas críticas; mantiene certificación si se integra bien	Requiere datos; generalización; costo de entrenamiento

CONCLUSIONES

La revisión de la literatura reciente confirma que la integración de Redes Neuronales Artificiales (RNA) no busca sustituir los métodos exactos, sino potenciar su eficiencia interna. Al delegar decisiones críticas —como la ramificación (*branching*), la selección de cortes y las heurísticas primales— a modelos de aprendizaje, se logra un punto de equilibrio entre la optimalidad garantizada de los métodos clásicos y la velocidad de las metaheurísticas (Gasse et al., 2019; Nair et al., 2021; Deza y Khalil, 2023). En este contexto, la propuesta metodológica de representar los problemas de Programación Lineal Entera Mixta (PLEM) como grafos bipartitos procesados mediante Redes Neuronales de Grafos (GNN) resulta altamente coherente con los avances de mayor desempeño (Scavuzzo et

al., 2024). Este enfoque, modelado bajo un Proceso de Decisión de Markov en Árbol (*tree-MDP*) e integrado bajo el esquema *solver-in-the-loop*, permite que el sistema aprenda patrones estructurales de familias de instancias específicas, superando las reglas por defecto de motores como *SCIP – Solving Constraint Integer Programs* — (Du et al., 2025). Para validar estas ventajas frente a los métodos tradicionales, se concluye que la evaluación experimental debe ser multidimensional, reportando obligatoriamente: (i) el tiempo total de solución, (ii) la reducción del tamaño del árbol de búsqueda (ByB), (iii) la evolución de la brecha (*gap*) primal-dual y (iv) la capacidad de generalización ante instancias fuera de la muestra de entrenamiento.

Finalmente, como trabajo futuro, se plantea la implementación de un pipeline completo para familias de instancias objetivo, priorizando la reproducibilidad mediante

el uso de librerías estándar como MIPLIB, protocolos de semillas (seeds) controladas y configuraciones de presolve transparentes.

REFERENCIAS

- Bengio, Y., Lodi, A., y Prouvost, A. (2021). Machine learning for combinatorial optimization: A methodological tour d'horizon. *European Journal of Operational Research*, 290(2), 405–421. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.07.063>
- Deza, A., y Khalil, E. B. (2023). Machine Learning for Cutting Planes in Integer Programming: A Survey. *Proceedings of IJCAI-23*, 6592–6600. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2023/739>
- Du, S., Tong, J., y Fan, W. (2025). Learning efficient branch-and-bound for solving Mixed Integer Linear Programs. *Applied Soft Computing*, 172, 112863. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112863>
- Etheve, M., Alès, Z., Bissuel, C., Juan, O., y Kedad-Sidhoum, S. (2020). Reinforcement Learning for Variable Selection in a Branch and Bound Algorithm. arXiv:2005.10026. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.10026>
- Hillier, F. S., y Lieberman, G. J. (2020). *Introduction to Operations Research* (11th ed.). McGraw-Hill Higher Education.
- Gasse, M., Chételat, D., Ferroni, N., Charlin, L., y Lodi, A. (2019). Exact combinatorial optimization with graph convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.01629>
- Gupta, P., Gasse, M., Khalil, E. B., Kumar, M. P., Lodi, A., y Bengio, Y. (2020). Hybrid models for learning to branch. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.15212>
- González Ariza, Á. L., y García Llinás, G. (2015). *Manual práctico de investigación de Operaciones I* (4ta edición). Universidad del Norte.
- Llinás, R. R. (2003). *El cerebro y el mito del yo: el papel de las neuronas en el pensamiento y el comportamiento humanos*. Norma.
- Linares, P., Ramos, A., Sánchez, P., Sarabia, A., y Vitoriano, B. (2001). *Modelos matemáticos de optimización*. Universidad Pontificia Comillas.
- López, R. F., y Fernández, J. M. F. (2008). *Las redes neuronales artificiales*. Netbiblo.
- Nair, V., Bartunov, S., Gimeno, F., von Glehn, I., Lichocki, P., Lobov, I., O'Donoghue, B., Sonnerat, N., Tjandraatmadja, C., Vinyals, O., et al. (2021). Solving Mixed Integer Programs Using Neural Networks. arXiv:2012.13349. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.13349>
- Niebel, B. W., y Freivalds, A. (2014). *Ingeniería Industrial de Niebel: métodos, estándares y diseño del trabajo*. McGraw Hill.
- Ortiz, J. D. C., y Caro, G. V. (2017). *Introducción a la investigación de operaciones*. Universidad de Sevilla, Sección de Publicaciones ETSI.
- Pérez Peña, R. (2019). *Introducción a los modelos de optimización*. UniPiloto.
- Prawda, J. (2004). *Métodos y modelos de investigación de operaciones*. Vol. 1. Modelos determinísticos. Limusa.
- Salas, H. G. (2009). *Programación lineal aplicada*. Ecoe Ediciones.

- Salas, R. (2004). *Redes neuronales artificiales* [Manuscrito no publicado]. Departamento de Computación, Universidad de Valparaíso.
- Sánchez, M. M., Maggi, M. T., y Paredes, M. C. (2019). Resistencia al cambio en las organizaciones: propuesta para minimizarlo. *Palermo Business Review*, (19), 39-53. https://www.palermo.edu/economicas/cbrs/pdf/pbr19/PBR_19_02.pdf
- Scavuzzo, L., Aardal, K., Lodi, A., y Yorke-Smith, N. (2024). Machine learning augmented branch and bound for mixed integer linear programming. *Mathematical Programming, Series B*. <https://doi.org/10.1007/s10107-024-02130-y>
- Silva, B., y Torres, L. M. (2014). Acerca de una versión dinámica del problema de la mochila. *Revista Politécnica*, 34(1), 142-142. https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/253
- Taha, H. A. (2024). *Investigación de operaciones* (11.ª ed.). Pearson.
- Vargas Suárez, L., Cano Robles, I., y Ríos Mercado, R. Z. (2004). Aplicación de la programación lineal en el sector forestal. *Ingenierías*, 7(24), 19-26. http://eprints.uanl.mx/10144/1/24_aplicacion_de_la_programacion.pdf
- Winston, W. L., y Goldberg, J. B. (2005). *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos* (Vol. 4). Thomson.
- World Economic Forum. (2024). *The Global Risks Report 2024* (19th ed.). <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2024/>
- Zhang, J., Liu, C., Li, X., Zhen, H.-L., Yuan, M., Li, Y., y Yan, J. (2023). A survey for solving mixed integer programming via machine learning. *Neurocomputing*, 519, 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.11.024>

Autores

Julián Silva Rodríguez. Ingeniero Industrial, Magister en Ingeniería Industrial, Doctor en Ingeniería de Procesos; Docente-Investigador, Grupo de Investigación Gestión Industrial y Administrativa - GIGIA, Programa de Ingeniería Industrial, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7497-8632>

Email: julian.silva@docentes.umb.edu.co

Andrés Fernández Rosas. Ingeniero Industrial, Magister en Administración, Candidato a Doctor en Gestión; Docente-Investigador, Grupo de Investigación de Estudios Empresariales en Entornos Inciertos - EEENI, Programa de Administración de Empresas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia..

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8446-5871>

Email: andres.fernandez03@uptc.edu.co

Recibido: 06-06-2025

Aceptado: 20-11-2025

Metaheurísticas en ingeniería: una aproximación del estado del arte y sus implicaciones en gerencia de la construcción

Metaheuristics in engineering: an approach to the state of the art and its implications for construction management

Nolberto Sarmiento Mireles, Eduardo Vargas Cano

Palabras clave: metaheurísticas, investigación de operaciones, gerencia de la construcción, ScienceDirect

Key words: metaheuristics, operations research, construction management, ScienceDirect

RESUMEN

Este artículo analiza la evolución y el impacto de las metaheurísticas en la ingeniería, con énfasis en la gerencia de construcción y una influencia transversal en la Ingeniería Industrial. Empleando el protocolo PRISMA, se realizó una revisión sistemática de un corpus de 75 artículos recuperados de *ScienceDirect* —2020-2024—. Los resultados identifican una hegemonía investigativa liderada por China e Irán, naciones que concentran el 60% de la producción científica a través de autores destacados como Deng y Chen. Se documenta una transición definitiva hacia arquitecturas híbridas —30.7% de la muestra—, donde las técnicas predominantes incluyen la Inteligencia de Enjambre, los Algoritmos Genéticos y el Aprendizaje Profundo. Estos modelos optimizan procesos industriales críticos, incluyendo la logística de suministros y los sistemas de almacenamiento de energía. El análisis, reforzado por literatura de vanguardia de 2025, demuestra que la hibridación algorítmica fortalece la resiliencia operativa en entornos de recursos restringidos, como el de Venezuela. Se concluye que la convergencia tecnológica y la sostenibilidad multiobjetivo definen las tendencias de competitividad global para la gestión de infraestructuras en el próximo bienio.

ABSTRACT

This article analyzes the evolution and impact of metaheuristics in engineering, focusing on construction management and its transversal influence on Industrial Engineering. Employing the PRISMA protocol, a systematic review was conducted on a corpus of 75 articles retrieved from *ScienceDirect* —2020–2024—. The results identify a research hegemony led by China and Iran, nations that account for 60% of the scientific production through prominent authors such as Deng and Chen. A definitive transition toward hybrid architectures (30.7% of the sample) is documented, where predominant techniques include Swarm Intelligence, Genetic Algorithms, and Deep Learning. These models optimize critical industrial processes, including supply chain logistics and Battery Energy Storage Systems. The analysis, reinforced by state-of-the-art 2025 literature, demonstrates that algorithmic hybridization strengthens operational resilience in resource-constrained environments, such as Venezuela. It is concluded that technological convergence and multi-objective sustainability define the global competitiveness trends for infrastructure management in the coming biennium.

INTRODUCCIÓN

En el panorama actual de la ingeniería, la toma de decisiones ha trascendido el juicio empírico para apoyarse en modelos de optimización matemática de alta complejidad. Ante problemas de naturaleza compleja, donde los métodos exactos resultan computacionalmente prohibitivos para instancias de gran escala, las metaheurísticas se han consolidado como la estrategia predominante para hallar soluciones cuasi-óptimas en tiempos de ejecución prácticos (Garey y Johnson, 1979; Saka et al., 2016; Houssein et al., 2025). Estas herramientas, que abarcan desde algoritmos bio-inspirados hasta sistemas basados en el comportamiento social y físico, han permitido a la Investigación de Operaciones abordar la incertidumbre, la estocasticidad y la multiobjetividad en el diseño de sistemas de ingeniería cada vez más interconectados.

A pesar de su origen histórico en la manufactura y la logística industrial, la Gerencia de Construcción ha adoptado recientemente este paradigma para mitigar la baja productividad y los sobrecostos que caracterizan al sector a nivel global. Autores como Cheng et al. (2024) y Jakubczyk-Gałczyńska et al. (2024), demuestran que la integración de algoritmos de inteligencia de enjambre (*Swarm Intelligence*) y técnicas de aprendizaje por refuerzo es fundamental para resolver el Problema de Programación de Proyectos con Recursos Restringidos (RCPSP). Este desafío, crítico en la gestión

de infraestructura moderna, exige un equilibrio dinámico entre la disponibilidad limitada de mano de obra, maquinaria y los plazos contractuales agresivos.

La construcción, analizada hoy como un sistema de producción bajo condiciones de alta variabilidad, encuentra en las metaheurísticas la capacidad de optimizar el *trade-off* entre tiempo, costo, calidad y, más recientemente, la sostenibilidad ambiental. Este enfoque supera las limitaciones deterministas de las técnicas de redes tradicionales como CPM o PERT, las cuales fallan al capturar la complejidad de los entornos de obra actuales (ElSahly et al., 2023; Jakubczyk-Gałczyńska et al., 2024; Martí et al., 2025). Además, el surgimiento de las *matheuristics* y la optimización asistida por IA está permitiendo una gestión proactiva, donde el algoritmo no solo busca la eficiencia, sino que se adapta a las interrupciones en tiempo real (Ding et al., 2026; Sulaiman et al., 2025).

El presente artículo ofrece una aproximación al estado del arte de estas técnicas, analizando su evolución técnica y sus implicaciones directas en la gerencia de la construcción. A través de una revisión de la literatura de *ScienceDirect*, se examina cómo la digitalización y el uso de algoritmos avanzados están redefiniendo la eficiencia en este sector. El objetivo es proporcionar una visión que permita a los gerentes de proyecto y académicos transitar hacia una gestión basada en la precisión algorítmica, la competitividad industrial y la resiliencia operativa.

Marco Teórico

La Investigación de Operaciones y la Complejidad en Ingeniería

La Investigación de Operaciones (IO) se define como la aplicación de métodos analíticos avanzados para facilitar la toma de decisiones óptimas en sistemas complejos. En la ingeniería moderna, muchos de estos problemas se clasifican como NP-duros (*Non-deterministic Polynomial-time hard*), lo que implica que el tiempo necesario para encontrar una solución óptima global crece exponencialmente con el tamaño del problema (Garey y Johnson, 1979). En la gestión de proyectos, esto se manifiesta en el Problema de Programación de Proyectos con Restricción de Recursos (RCPSP, por su siglas en inglés, *Resource-Constrained Project Scheduling Problem*), donde las interdependencias entre actividades y la limitación de recursos impiden el uso eficiente de métodos exactos tradicionales.

Fundamentos de las Metaheurísticas

Las metaheurísticas son estrategias de optimización de alto nivel que diseñan o seleccionan una heurística —algoritmo de búsqueda— para proporcionar una solución suficientemente buena a un problema de optimización, especialmente con información incompleta o capacidad computacional limitada (Houssein et al., 2025; Saka et al., 2016; Sulaiman et al., 2025). A diferencia de los algoritmos exactos, las metaheurísticas no garantizan el óptimo global, pero ofrecen soluciones cuasi-óptimas mediante un equilibrio entre la exploración —búsqueda en nuevas áreas

del espacio de soluciones— y la explotación —refinamiento de las mejores soluciones encontradas— (Ahmed Shaban et al., 2025).

Taxonomía y Algoritmos de Vanguardia

La literatura científica reciente clasifica las metaheurísticas principalmente por su fuente de inspiración. Los algoritmos de Inteligencia de Enjambre (Swarm Intelligence), como la Optimización por Cúmulo de Partículas (PSO) y los algoritmos basados en comportamientos biológicos complejos, han demostrado una robustez superior en la ingeniería civil al manejar funciones objetivo no lineales y discontinuas (Cheng et al., 2024; Houssein et al., 2025). Estos enfoques permiten una exploración exhaustiva del espacio de soluciones, superando las limitaciones de los métodos de gradiente tradicionales en entornos de diseño estructural y programación de obra.

Optimización Híbrida y Matheuristics

La frontera del conocimiento en la IO actual es la hibridación. Las matheuristics combinan las fortalezas de los modelos de programación matemática con la flexibilidad de las metaheurísticas. Según Martí et al. (2025), esta integración representa la evolución técnica necesaria para abordar problemas de gran escala. En el sector de la construcción, este enfoque facilita la gestión de la logística y la nivelación de recursos, integrando además técnicas de Machine Learning para la predicción de escenarios inciertos —clima, retrasos y variabilidad de costos—, tal como proponen Jakubczyk-Gańczyńska et

al. (2024) al combinar heurísticas con redes bayesianas.

Aplicación en la Gerencia de Construcción

En el ámbito de la gerencia de proyectos de infraestructura contemporánea, la optimización ha evolucionado desde el control de parámetros aislados hacia un enfoque integral de Sostenibilidad Multiobjetivo (MOO). Bajo este paradigma, las metaheurísticas no buscan una solución única, sino la construcción de un Frente de Pareto que permita evaluar los equilibrios críticos o trade-offs entre costo, tiempo, calidad e impacto ambiental. Este enfoque facilita una toma de decisiones estratégica donde ninguna variable puede optimizarse sin degradar otra, fundamentando la praxis profesional en evidencia algorítmica y no únicamente en la experiencia empírica (Cheng et al., 2024; Deng, 2024).

La literatura científica reciente demuestra que la implementación de estas herramientas es fundamental en diversos ejes operativos de la construcción. El uso de algoritmos de Inteligencia de Enjambre ha ganado terreno en la programación de tareas complejas, logrando reducir significativamente los márgenes de incertidumbre en los cronogramas de proyectos masivos (Chen, 2024; Zhang et

al., 2025). Paralelamente, la eficiencia energética en los sitios de obra ha cobrado relevancia mediante la integración de sistemas de almacenamiento de energía (BESS), los cuales han sido optimizados a través de modelos híbridos para asegurar la continuidad operativa en entornos con restricciones severas de suministro eléctrico (Grisales-Noreña et al., 2023).

Asimismo, la gestión de la cadena de suministro se ha visto potenciada por el uso de Algoritmos Genéticos y Aprendizaje Profundo, permitiendo resolver problemas críticos de distribución y almacenamiento donde la variabilidad estocástica de los materiales exige una respuesta dinámica en tiempo real (Wari, 2023; Abualigah, 2023). Es imperativo notar que, aunque estas aplicaciones emergen de la necesidad de gestionar proyectos de infraestructura, su arquitectura computacional posee una incidencia directa en los procesos de la ingeniería industrial. La optimización de flujos logísticos y la resiliencia operativa desarrolladas en la construcción sirven como base técnica para incrementar la competitividad en sistemas de producción masiva y manufactura de alta precisión en el contexto tecnológico actual.

METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática de literatura bajo un enfoque cualitativo-descriptivo. Se empleó el protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) para

asegurar el rigor, la transparencia y la reproducibilidad en la selección y análisis del corpus documental.

El empleo del protocolo PRISMA responde a la necesidad de mitigar el sesgo de selección y elevar la calidad de las revisiones de literatura en el ámbito

científico. Según Page et al. (2021), este estándar internacional permite estructurar de forma lógica el flujo de información, desde la identificación inicial hasta la síntesis de resultados, asegurando que la revisión sea exhaustiva y reproducible. En el campo de la ingeniería, autores como Houssein et al. (2025), Power (2021) y Wari et al. (2023), entre otros, recomiendan la adopción de este marco metodológico para mapear estados del arte complejos, ya que facilita la categorización de algoritmos y la identificación de brechas tecnológicas en la investigación de operaciones aplicada a la infraestructura. La implementación de esta metodología garantiza que la transición de las metaheurísticas desde la ingeniería general hacia áreas específicas como Ingeniería Industrial o gerencia de construcción, se sustente en una base documental sólida, técnica y metodológicamente validada por los estándares más exigentes de la disciplina, siguiendo las recomendaciones de actualización publicadas incluso durante el presente año (Houssein et al., 2025).

Estrategia de Búsqueda y Fuente

La recolección de información se realizó exclusivamente en la base de datos *ScienceDirect* (Elsevier). Esta elección se fundamenta en el alto rigor científico y la robustez técnica de *ScienceDirect*, una de las mayores bases de datos de literatura revisada por pares en el mundo, lo cual garantiza, siguiendo a Codina (2020), que los hallazgos consultados posean la validez académica necesaria para sustentar una investigación formal mediante el acceso a revistas de alto factor de impacto.

Asimismo, la utilización de este repositorio responde a la recomendación explícita del docente del curso, quien identifica en esta herramienta el estándar de excelencia requerido para el desarrollo de la asignatura, asegurando así que el trabajo se alinee con las directrices metodológicas institucionales y los criterios de evaluación establecidos para el rigor académico del proyecto.

Para la recuperación de los registros, se utilizó el motor de búsqueda avanzada de *ScienceDirect* mediante la combinación de los descriptores: "*metaheuristics*" AND "*operations research*". Con el fin de garantizar la pertinencia con el área de estudio, la búsqueda se restringió a los campos de título del artículo y resumen.

Criterios de Selección

Para la conformación de la muestra final, se aplicaron filtros estrictos basados en la calidad técnica y la vigencia científica.

Para refinar la búsqueda avanzada, se seleccionaron los años 2020-2021-2022-2023-2024 para cubrir 5 años de estudio. Cabe destacar que, aunque el corpus documental para el análisis sistemático (n=75) se cerró cronológicamente en diciembre de 2024, la discusión y el análisis de resultados incorporan de forma complementaria referencias de vanguardia publicadas durante 2025. Esta decisión metodológica permite contrastar las tendencias halladas en el quinquenio con la frontera más reciente del conocimiento al momento de esta publicación.

Para el tipo de artículos, se seleccionaron los artículos de revisión y los artículos de investigación. En las subareas se

seleccionaron solamente los artículos de ingeniería.

Los criterios de inclusión y exclusión se resumen en la Tabla 1.

Procedimiento de Análisis

El proceso se dividió en tres etapas:

Identificación: Localización de registros en *ScienceDirect* aplicando los términos de búsqueda y filtros iniciales.

Cribado (Screening): Eliminación de registros que no cumplieran con los criterios de inclusión tras la revisión del título y resumen.

Inclusión: Análisis a texto completo de los artículos seleccionados para extraer las implicaciones directas en la Gerencia de Construcción, tales como la optimización de cronogramas, gestión de suministros y eficiencia en el uso de recursos.

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión del protocolo de búsqueda

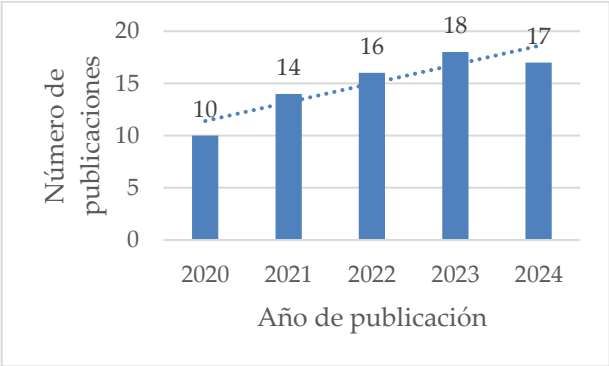
Criterios de Inclusión (CI)	Criterios de Exclusión (CE)
Ventana temporal: Artículos publicados entre 2020 y 2024.	Investigaciones publicadas en años anteriores a 2020, y después de 2024.
Idioma: Documentos redactados en inglés.	Artículos en español, chino u otros idiomas.
Tipo de documento: Artículos de investigación (<i>Research articles</i>) y de revisión (<i>Review articles</i>).	Capítulos de libros, conferencias (<i>proceedings</i>), editoriales o notas técnicas.
Área temática: Registros categorizados en la sección de <i>Engineering</i> .	Artículos de áreas ajenas (ciencias sociales, artes o medicina).
Relevancia: Estudios que vinculen metaheurísticas con la Investigación de Operaciones.	Estudios puramente teóricos sin aplicación práctica en problemas de ingeniería.

RESULTADOS

Tras el proceso de cribado en la base de datos *ScienceDirect*, se consolidó una muestra final de 75 artículos científicos. El análisis de la distribución anual muestra un crecimiento sostenido que alcanza su madurez en los últimos dos años del quinquenio, desglosándose en 10 artículos para 2020, 14 para 2021, 16 para 2022, 18 para 2023 y 17 registros al cierre de 2024; tal como se muestra en la figura 1.

La tendencia muestra un crecimiento constante, con un pico de actividad en 2023 y un cierre de 2024 muy robusto que confirma la vigencia del tema. Este flujo constante confirma que el uso de metaheurísticas es una herramienta consolidada en la ingeniería actual.

Figura 1. Evolución temporal de la producción científica sobre Metaheurísticas en Ingeniería



El análisis de la afiliación institucional del autor principal de los artículos, cuya distribución se presenta en la tabla 2, revela el liderazgo de China (23 artículos), que actúa como un polo de atracción para

talento internacional. Le siguen en importancia regional Irán (13) e India (9).

Tabla 2. Distribución geográfica y adscripción institucional de la producción científica

País / Región	Cantidad de Artículos	Porcentaje (%)
China	23	31%
Irán	13	17%
Latinoamérica (Colombia/Brasil)	10	13%
India	9	12%
España / Europa	7	9%
Sudeste Asiático (Tailandia/Vietnam)	7	9%
Otros (Jordania, Egipto, Arabia S.)	6	8%
TOTAL	75	100%

En el ámbito occidental, destaca la consolidación de Colombia como referente en Latinoamérica (con 8 de los 10 registros de la región), enfocada en la optimización de sistemas de potencia. Por su parte, la presencia europea se ve fortalecida por investigadores radicados en España (como Meisam Mahdavi), mientras que el avance en fundamentos algorítmicos tiene un epicentro claro en Jordania a través de la producción de Abualigah (2024). El Sudeste Asiático, liderado por Tailandia, aporta un 9% de la muestra total, cerrando un mapa de conocimiento altamente diversificado.

En lo que respecta a la configuración técnica de las soluciones analizadas, la distribución de las 75 publicaciones revela una jerarquía clara en el uso de modelos de optimización. La Inteligencia de Enjambre (Swarm Intelligence) se posiciona como el

enfoque predominante con 34 artículos (45.3%), fundamentados en el comportamiento colectivo de sistemas biológicos. Le siguen las arquitecturas híbridas (30.7%), que evidencian una tendencia creciente hacia la integración de metaheurísticas con técnicas de *Machine Learning* (como *Q-Learning* y *Deep Learning*). Finalmente, un 24% de la muestra se adscribe a algoritmos evolutivos y de inspiración física. Esta distribución cuantitativa se resume en la Tabla 3.

Tabla 3. Distribución de las soluciones analizadas

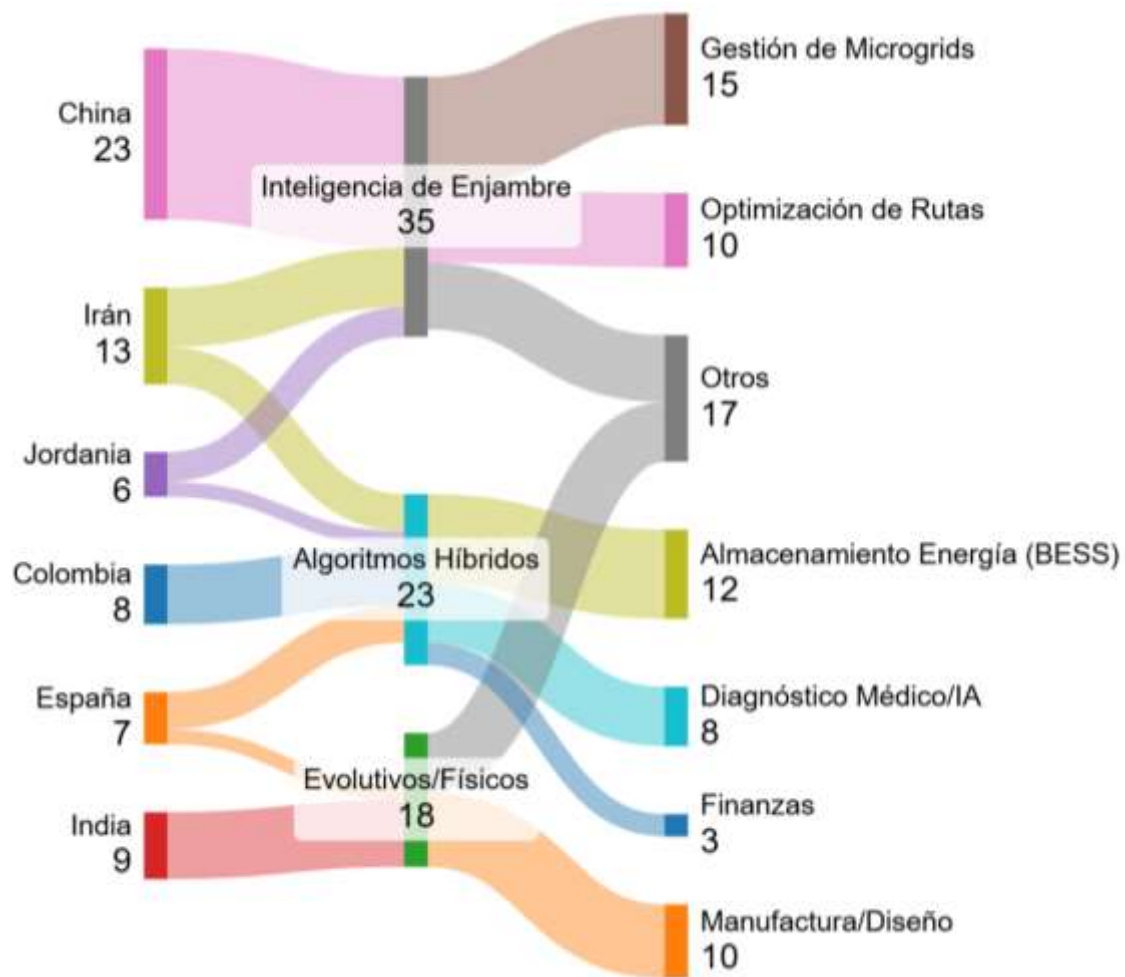
Categoría Algorítmica	Número de Artículos	Porcentaje (%)	Enfoque Principal
Inteligencia de Enjambre	34	45.3%	Bio-inspiración colectiva y comportamiento social.
Híbridos y Machine Learning	23	30.7%	Convergencia entre metaheurísticas y aprendizaje automático.
Evolutivos y de Inspiración Física	18	24.0%	Leyes físicas, químicas y mecanismos de selección natural.
TOTAL	75	100%	

Más allá de la distribución cuantitativa, resulta imperativo comprender la interconexión entre las arquitecturas tecnológicas, su procedencia geográfica y las demandas industriales específicas. Para ello, se presenta un análisis de convergencia mediante el diagrama de flujo (Sankey) de la Figura 2. Este flujo evidencia patrones de especialización regional altamente diferenciados: mientras

los nodos de investigación en China y Jordania manifiestan una marcada predilección por la inteligencia de enjambre aplicada a la gestión de microgrids, el eje estratégico conformado por Colombia y España exhibe una convergencia hacia algoritmos híbridos orientados a sistemas de almacenamiento

de energía (BESS). Esta visualización confirma que la selección de la arquitectura algorítmica no es azarosa, sino que responde a una estrecha vinculación con los desafíos de infraestructura y las agendas de desarrollo de cada ecosistema científico.

Figura 2. Flujo de distribución de los 75 artículos seleccionados según país de origen, taxonomía algorítmica y área temática



Nota. Gráfico generado por SankeyMATIC.COM a partir de información de los autores.

Finalmente, el análisis identifica una alta concentración de la producción científica en revistas indexadas de primer nivel, lo

que garantiza el rigor técnico y la relevancia académica de la muestra seleccionada. La Tabla 4 detalla las fuentes

editoriales con mayor frecuencia de publicación, destacando el liderazgo de Computers y Industrial Engineering y

Applied Soft Computing en el desarrollo de estas arquitecturas.

Tabla 4. Distribución de artículos seleccionados según la fuente editorial (n=75).

Revista Científica	Frecuencia (Artículos)	Cuartil Sugerido (Referencia)
Computers y Industrial Engineering	12	Q1
Applied Soft Computing	9	Q1
Journal of Energy Storage	8	Q1
Applied Energy	7	Q1
Electric Power Systems Research	6	Q2/Q1
Journal of Manufacturing Systems	5	Q1
Engineering Applications of Artificial Intelligence	5	Q1
Alexandria Engineering Journal	5	Q1
Computers, Materials and Continua	5	Q2
Int. Journal of Electrical Power y Energy Systems	5	Q1
Otras (Ain Shams, Results in Engineering, etc.)	8	-
TOTAL	75	

Análisis y discusión

La interpretación de los hallazgos permite establecer que la investigación de operaciones ha trascendido el ejercicio teórico para consolidarse como un motor de transferencia tecnológica global. Para este análisis, se ha contrastado el corpus sistemático de 75 artículos (2020-2024) con literatura de vanguardia publicada durante el año 2025, asegurando que la discusión técnica refleje la frontera del conocimiento al cierre del presente año. Bajo esta premisa, los resultados revelan una marcada hegemonía geográfica donde el

60% de la producción científica (n=45 artículos) se concentra en potencias emergentes como China, Irán e India. Autores líderes en la muestra como Deng (2024), Chen (2024) y Zhang (2024) evidencian una transición hacia modelos de aprendizaje híbrido y optimización bajo incertidumbre, sugiriendo que el desarrollo de metaheurísticas está intrínsecamente ligado a naciones con planes masivos de infraestructura. Para contextos como el de Venezuela, esta transferencia resulta crítica; la adopción de algoritmos probados en escenarios con

desafíos logísticos similares permite optimizar la asignación de recursos limitados mediante la analítica prescriptiva. Al respecto, Wari (2023) ofrece un marco metodológico basado en la optimización y el mantenimiento que es directamente aplicable a la gestión de activos en construcción, mientras que trabajos como el de Abualigah (2023) demuestran cómo las metaheurísticas de enjambre revolucionan la gestión de suministros sostenibles. En este sentido, el análisis de las arquitecturas propuestas por Cheng et al. (2021) y Jakubczyk-Gałczyńska et al. (2024) proporciona un marco de referencia robusto para mitigar la volatilidad en la disponibilidad de insumos en entornos complejos.

Paralelamente, se identifica una evolución hacia la robustez mediante la hibridación algorítmica, tendencia que representa el 30.7% de la muestra (n=23 artículos). Este desplazamiento indica que la ingeniería moderna prioriza la resiliencia operativa bajo condiciones de incertidumbre estocástica. Autores clave del corpus como Grisales-Noreña et al. (2024) y Cortés-Cañedo (2024) destacan la eficiencia de los enfoques híbridos para la coordinación de recursos y el almacenamiento de energía (BESS), aplicaciones que resultan directamente transferibles al escenario venezolano para garantizar la continuidad operativa frente a la inestabilidad de los servicios básicos o la fluctuación de costos de materiales.

Asimismo, la integración de Machine Learning con optimizadores permite que los modelos no solo busquen el costo

mínimo, sino que aprendan de las interrupciones del entorno. Esta sinergia, analizada exhaustivamente por Karimi-Mamaghan et al. (2022), facilita una gestión proactiva donde las metaheurísticas se ven potenciadas por la capacidad de análisis de datos de la IA para resolver problemas combinatorios complejos. Investigaciones de vanguardia fuera del corpus original confirman que este enfoque híbrido es la tendencia dominante para lograr una optimización global robusta frente a la incertidumbre (Bolufé-Röhler y Tamayo-Vera, 2025; Zhang et al., 2025). Esta tendencia se consolida con propuestas como la de Xiong et al. (2025), quienes mediante algoritmos de inteligencia de enjambre mejorados logran un equilibrio superior entre la exploración de soluciones y la precisión técnica en entornos de ingeniería con múltiples restricciones.

Finalmente, la sostenibilidad se ha consolidado como un eje transversal: el 40% de las publicaciones del corpus (n=30 artículos) integran la eficiencia energética como una variable de decisión crítica. Investigaciones destacadas de la muestra como las de Cai (2024) sobre carga óptima de sistemas térmicos y Ghaemi (2023) sobre planificación multiobjetivo bajo incertidumbre, demuestran que la frontera de optimización actual permite equilibrar la rentabilidad económica con la minimización del impacto ambiental. La integración de tecnologías de vanguardia, como el uso de drones para la asistencia en rutas y logística de última milla (Campuzano, 2023; Mesa, 2023), asegura que la toma de decisiones en ingeniería no

dependa de estimaciones empíricas, sino de procesos de optimización rigurosos capaces de responder con agilidad a la

complejidad de la industria contemporánea.

CONCLUSIONES

La revisión sistemática de literatura, ejecutada bajo el rigor del protocolo PRISMA, permite concluir que la investigación de operaciones en la ingeniería contemporánea atraviesa un cambio de paradigma hacia la convergencia tecnológica. El análisis exhaustivo del corpus de 75 artículos seleccionados de ScienceDirect evidencia que los modelos estáticos convencionales han sido superados por arquitecturas dinámicas. En términos de liderazgo global, potencias como China e Irán (lideradas por autores como Deng, 2024 y Chen, 2024) se consolidan como los nodos de mayor impacto, estableciendo el estándar en la aplicación de metaheurísticas a infraestructuras masivas, lo que sirve de referencia técnica para economías emergentes.

Se establece que la hibridación algorítmica —específicamente la sinergia entre metaheurísticas de segunda generación y técnicas de aprendizaje profundo— representa el tema emergente con mayor proyección, presente en el 30.7% de la muestra (n=23 artículos). Esta tendencia, respaldada por el análisis de autores del corpus como Wari (2023) y proyectada hacia la frontera del conocimiento por Zhang et al. (2025), dota a los sistemas de

gestión de una capacidad predictiva sin precedentes. En contextos de alta incertidumbre y restricción de recursos, como el de Venezuela, la adopción de estas arquitecturas trasciende la mejora técnica para convertirse en un imperativo operativo, fundamental para garantizar la viabilidad financiera frente a la volatilidad de los servicios básicos y suministros.

Como consideración metodológica final, se reconoce que aunque el estudio se fundamentó en ScienceDirect, la discusión se enriqueció con literatura complementaria aportada por la línea de investigación del autor para capturar los avances de 2025. Bajo esta premisa, se proyecta que para el próximo bienio, la optimización no se limitará a la eficiencia monetaria, sino a la consolidación de la analítica prescriptiva y la sostenibilidad multiobjetivo. Los hallazgos subrayan que el futuro de la gestión de infraestructuras dependerá de la capacidad de los profesionales para migrar de una praxis empírica hacia una ingeniería basada en evidencia algorítmica. El dominio de estas herramientas se posiciona como el factor diferenciador para transformar la industria de la construcción en una actividad de precisión industrial y alta competitividad global.

REFERENCIAS

- Abualigah, L. (Ed.). (2024). *Metaheuristic Optimization Algorithms: Optimizers, Analysis, and Applications*. Morgan Kaufmann. <https://www.sciencedirect.com/book/9780443139253/metaheuristic-optimization-algorithms>
- Abualigah, L., Hanandeh, E. S., Zitar, R. A., Thanh, C. L., Khatir, S., y Gandomi, A. H. (2023). Revolutionizing sustainable supply chain management: A review of metaheuristics. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 106839. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106839>
- Ahmed Shaban, A., Almufti, S. M., y Asaad, R. R. (2025). Metaheuristic Algorithms for Engineering and Combinatorial Optimization: A Comparative Study Across Problems Categories and Benchmarks. *International Journal of Scientific World*, 11(2), 38-49. <https://www.sciencepubco.com/index.php/IJSW/article/view/34510>
- Bolufé-Röhler, A., y Tamayo-Vera, D. (2025). Machine Learning for Enhancing Metaheuristics in Global Optimization: A Comprehensive Review. *Mathematics*, 13(18), 2909. <https://doi.org/10.3390/math13182909>
- Bosi, T., Rinaldi, M., y Viti, F. (2026). Metaheuristic optimization for scheduling mixed-fleet electric buses in a practical urban network. *Computers y Industrial Engineering*, 213, 111782. <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.112103>
- Cai, J., Yang, H., y Xu, K. (2024). Optimal chiller loading considering the energy loss associated with the switching of chillers based on a novel hybrid fuzzy-metaheuristic method. *Energy and Buildings*, 318, 114489. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114489>
- Campuzano, G., Lalla-Ruiz, E., y Mes, M. (2023). The drone-assisted variable speed asymmetric traveling salesman problem. *Computers y Industrial Engineering*, 176, 108981. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.108981>
- Chen, P., y Wang, Q. (2024). Learning for multiple purposes: A Q-learning enhanced hybrid metaheuristic for parallel drone scheduling traveling salesman problem. *Computers y Industrial Engineering*, 187, 109812. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109812>
- Cheng, M. Y., Sholeh, M. N., y Kristiana, D. (2024). Artificial satellite search: A new metaheuristic algorithm for optimizing truss structure design and project scheduling. *Applied Mathematical Modelling*, 130, 45-68. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.10.022>
- Ding, Y., Xia, T., y Xi, L. (2026). A hybrid metaheuristic for joint decision-making in remanufacturing-integrated operation and maintenance of complex manufacturing systems. *Advanced Engineering Informatics*, 63, 102845. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.102845>
- ElSahly, O. M., Ahmed, S., y Abdel-Fattah, A. (2023). Systematic Review of the Time-Cost Optimization Models in Construction Management. *Sustainability*, 15(6), 5578. <https://doi.org/10.3390/su15065578>
- Fu, Y., Dong, J., y Zhu, L. (2025). A review on metaheuristics for solving home health care routing and scheduling problems. *Applied Soft Computing*, 165, 112014. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112014>
- Garey, M. R., y Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman.

- Ghaemi, Z., Tran, T. T. D., y Smith, A. D. (2022). Comparing classical and metaheuristic methods to optimize multi-objective operation planning of district energy systems considering uncertainties. *Applied Energy*, 321, 119400. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119400>
- Grisales-Noreña, L. F., Cortes-Caicedo, B., y Muñoz, J. (2024). Enhancing DC distribution network efficiency through optimal power coordination in lithium-ion batteries: A sparse nonlinear optimization approach. *Journal of Energy Storage*, 96, 112484. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112484>
- Houssein, E. H., Hossam Abdel Gafar, M., Fawzy, N., y Sayed, A. Y. (2025). Recent metaheuristic algorithms for solving some civil engineering optimization problems. *Scientific Reports*, 15, 7929. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90000-8> <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111782>
- Jakubczyk-Gańczyńska, A., Siemaszko, A., y Poltavets, M. (2024). Optimizing Construction Engineering Management Using Metaheuristic Methods and Bayesian Networks. *Applied Sciences*, 14(11), 4871. <https://doi.org/10.3390/app14114871>
- Karimi-Mamaghan, M., Mohammadi, M., Meyer, P., y Karimi-Mamaghan, A. M. (2022). Machine learning at the service of metaheuristics for solving combinatorial optimization problems: A state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, 296(2), 393-422. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.04.032>
- Martí, R., Sevaux, M., y Sörensen, K. (2025). Fifty years of metaheuristics. *European Journal of Operational Research*, 321(2), 345-362. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.04.004>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... y Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(n71). <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Power, J. (2021). Systematic reviews in engineering education: a catalyst for change. *European Journal of Engineering Education*, 46(6), 1163-1174. <https://doi.org/10.1080/03043797.2021.1980770>
- Saka, M. P., Hasançebi, O., y Geem, Z. W. (2016). Metaheuristics in structural optimization and discussions on harmony search algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 28, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.01.005>
- Sulaiman, M. H., Mustaffa, Z., Samsudin, A. S., Mohamed, A. I., y Saari, M. M. (2025). Electric vehicle battery state of charge estimation using metaheuristic-optimized CatBoost algorithms. *Franklin Open*, 11, 100293. <https://doi.org/10.1016/j.fraope.2025.100293>
- Wari, E., Zhu, W., y Lim, G. (2023). Maintenance in the downstream petroleum industry: A review on methodology and implementation. *Computers y Chemical Engineering*, 172, 108177. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108177>
- Xiong, H., Shen, Z., y Zhang, H. (2025). Multi-objective intelligent optimization design method for mix proportions of hydraulic asphalt concrete facings. *Ain Shams Engineering Journal*, 16(12), 103781. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103781>
- Zhang, R., Wang, J., Liu, C., Su, K., Ishibuchi, H., y Jin, Y. (2025). Synergistic integration of metaheuristics and machine learning: latest advances and emerging trends. *Artificial Intelligence Review*, 58, 268. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11266-y>

Autores

Nolberto Sarmiento Mireles. Ingeniero Civil, Universidad de Carabobo, Estudiante de Maestría Gerencia de la Construcción, Universidad de Carabobo, Venezuela. Docente-Investigador Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7297-453X>

Email: nolsarmientomireles@gmail.com

Eduardo Vargas Cano. Ingeniero Industrial, Magister en Gerencia de la Construcción, Magister en Estadística, Universidad Central de Venezuela. Docente Investigador Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1293-1550>

Email: eevargas1@uc.edu.ve

Recibido: 06-06-2025

Aceptado: 20-11-2025

Revista Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias

Normas para Publicación

La Revista “*Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias*” tiene como objetivo divulgar resultados de investigaciones en las áreas de ingeniería de métodos, ergonomía, productividad y calidad, investigación de operaciones, sistemas de producción e inventarios, logística, cadenas de suministro, simulación, estadística aplicada, y en general aquellos temas en los cuales la Ingeniería Industrial converge con otras ciencias.

La Revista acepta trabajos que puedan ser incluidos en las siguientes secciones: Artículos de Investigación, Artículos de Divulgación (de interés general), Información y/o Resumen de Eventos Académicos relacionados con la Ingeniería Industrial y Reseñas Bibliográficas, Notas Técnicas o Estados del Arte, relacionados con Ingeniería Industrial.

Todos los trabajos deben ser originales e inéditos, en idioma español, inglés o portugués, y no estar en proceso de arbitraje por otras revistas. Si el trabajo se presentó en algún evento científico o similar, se deben suministrar los detalles correspondientes (nombre completo, fecha, lugar, institución organizadora).

Aspectos Formales

-**Título:** breve y claro

-**Datos del Autor o Autores:** presentar los nombres completos de los autores y su afiliación institucional, incluyendo: títulos, correo(s) electrónico(s), institución de procedencia. Los autores deben presentar su ORCID (“*Open Researcher and Contributor ID*”, <https://orcid.org/>).

-**Redacción adecuada.** Escrito en Mayúsculas y minúsculas, según reglas gramaticales y en tercera persona.

-**Ortografía.** No presentar faltas de ortografía. Cuidar la acentuación y puntuación.

Especificaciones del Formato

-**Tamaño del papel y márgenes:** carta, márgenes superior e inferior 2,5 cm., izquierdo y derecho 3 cm.

-**Tipo de letra Times New Roman**, tamaño 12, justificado, un espaciado (6 puntos) entre párrafos, sin sangría e interlineado doble.

-**Extensión:** no menor de diez ni mayor de 30 páginas.

-**Ilustraciones:** el artículo puede contener cualquier tipo de ilustración (fotografía, dibujo, gráfico, cuadro o tabla, y deberá llevar su debida identificación y referencia previa. Las fotos deben contener pie de foto explicativo, y cualquier tipo de imagen debe ser de alta calidad en formatos TIFF o JPG. Los dibujos o esquemas deben ser en original, y ser incrustados como imágenes no editables dentro del texto (evitar imágenes producidas por la agregación de múltiples objetos). El editor solicitará las tablas y figuras en formato editable.

Estructura del Contenido**Artículos de Investigación**

Resumen en español (o portugués) e inglés (Abstract): debe contener los aspectos básicos del artículo: planteamiento del problema, metodología usada y breve reseña de los resultados. El número de palabras no debe exceder de 200.

a. **Introducción:** señalar en qué consiste el trabajo completo, su objetivo, antecedentes, estado actual del problema e hipótesis del estudio.

b. **Metodología:** describir en forma precisa el procedimiento realizado para comprobar la hipótesis y los recursos empleados en ello.

c. **Resultados:** expresar el producto del trabajo con claridad; se pueden presentar también datos de medición o cuantificación.

d. **Discusión:** interpretar los resultados de acuerdo con estudios similares, enunciar ventajas del estudio, sus aportaciones, evitando adjetivos que elogien los resultados.

e. **Conclusiones:** precisar qué resultados se obtuvieron y si permitieron verificar la hipótesis, plantear perspectivas del estudio, la aplicación de los resultados.

f. **Referencias bibliográficas:** enlistar en orden alfabético las principales fuentes bibliográficas consultadas y citadas, siguiendo las normas de la APA vigentes. Cuanto sea aplicable, debe incluir el DOI (*Digital Object Identifier*).

Artículos de Divulgación

Corresponde a artículos de temas relevantes de ciencia, tecnología, entre otros, que van dirigidos al público profesional y académico, por lo que deben ser escritos en lenguaje claro y accesible. La presentación del contenido dependerá de la naturaleza del tema, sin embargo, se recomienda la estructura general del artículo de investigación. Se establece hasta un máximo de tres autores para artículos de revisión documental, en general para aquellos que no contemplen investigación experimental o análisis de datos cuantitativos.

En general, las normas de redacción, presentación de tablas y gráficos, uso de citas de cualquier tipo, señalamientos de autores, referencias bibliográficas y electrónicas y otros aspectos editoriales deben ajustarse a las Normas de la “*American Psychological Association*” (APA). Como orientación para los autores en la presentación de las referencias bibliográficas, a continuación, se presentan los casos más usados:

Libro:

Gutiérrez, H. (2020). *Calidad Total y Productividad, quinta edición*. McGraw-Hill Interamericana de España.

Revista (Publicaciones periódicas):

Lima, L. y Tinoco, M. (2022). Avaliação da percepção de valor do cliente de jornais digitais: estudo de caso de uma empresa jornalística na região sul do Brasil. *Revista Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias*, 8(28), 27–52. <https://doi.org/10.54139/riiant.v8i28.377>

Instrucciones de Envío

Para enviar un artículo es necesario que el documento cumpla estrictamente con los lineamientos de formato y de contenido anteriormente especificados. ***No se aceptarán trabajos que no cumplan con las normas establecidas en este documento.*** El trabajo debe enviarse a la siguiente dirección electrónica: revistaiiaynt@gmail.com, con copia a revistaiiaynt@uc.edu.ve.

Sistema de arbitraje

Todos los trabajos a publicarse se someterán a un proceso de evaluación anónima (revisión ciega) por parte de especialistas (revisión por pares), donde participan evaluadores externos. Antes de enviar el trabajo (sin identificación) al Comité Científico para el proceso de arbitraje, el Comité Editorial revisa el cumplimiento de los requisitos de forma y el ajuste a los objetivos de la Revista, por lo que podrá realizar correcciones gramaticales y modificaciones literarias, que no alteren el sentido sin consultar con el autor.

De acuerdo con el formato establecido, el Comité Científico podrá dictaminar si el trabajo es: Publicado sin correcciones, Publicado después de correcciones, Publicado después de corregir extensivamente y No publicar. Una vez realizado el arbitraje por parte del Comité Científico, el Comité Editorial recopila los resultados y los envía a los autores. Cualquier controversia en el dictamen será resuelta por el Comité Editorial.

Generalidades

Los contenidos de los trabajos que aparecen en la Revista “*Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*” son de la entera responsabilidad de sus autores. De ser aceptado el trabajo, el autor principal recibirá la versión digital vía correo electrónico.

Los artículos publicados en la Revista “*Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias*” son de su propiedad, por lo que se reserva los derechos de distribución de los contenidos. Podrán ser reproducidos con autorización escrita del Editor.

Política de Acceso Abierto Inmediato (AAI). La Revista “*Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias*” permite leer, descargar, copiar, distribuir, imprimir, buscar o vincular los textos completos de sus artículos, de manera inmediata y gratuita después de su publicación; así mismo, no efectúa cargos monetarios por revisión, procesamiento, evaluación o publicación de artículos (cargos por procesamiento de artículos “APC”) a autores y/o instituciones.

Comité Editorial
Diciembre, 2025

Editorial

Artículos de investigación

- Modelo dinámico para el pronóstico de la demanda en empresa de alimentos**

Dynamic model for demand forecasting in a food company

Normeviz Depablo Vizcaya, Paola Martínez Valero, Francisco Figueredo Lugo

7-24
- Evaluación de la eficiencia de equipos profesionales de fútbol mediante la combinación de AHP y DEA**

Evaluation of the efficiency of professional football teams through the combination of AHP and DEA

Pedro Teppa-Garran, Ezequiel Fernández

25-50
- Reducción de pérdidas en tratamiento de degradaciones de tubos de acero mediante la aplicación del Kobetsu-Kaizen**

Reduction of losses in treatment of steel tube degradation through application of the Kobetsu-Kaizen

Kimberly Colls Romero, Jesús Rangel Pérez, Jadlyn González de Urquiola

51-70

Artículos de divulgación

- Uso de redes neuronales artificiales para problemas de programación entera**

Using artificial neural networks for integer programming problems

Julián Silva Rodríguez, Andrés Fernández Rosas

73-88
- Metaheurísticas en ingeniería: una aproximación del estado del arte y sus implicaciones en la gerencia de construcción**

Metaheuristics in engineering: an approach to the state of the art and its implications for construction management

Nolberto Sarmiento Mireles, Eduardo Vargas Cano

89-102

- Normas para publicación**

103-104