

50

Junio  
2026

Revista de la Facultad  
de Ingeniería



# INGENIERÍA INDUSTRIAL





# INGENIERÍA INDUSTRIAL

*Ingeniería Industrial*

Revista de la Facultad de Ingeniería

de la Universidad de Lima

Carrera de Ingeniería Industrial

Número 50, junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50>

DIRECTOR

Marcos Fernando Ruiz-Ruiz, Universidad de Lima, Perú

<https://orcid.org/0000-0001-5147-8512>

EDITORA

María Teresa Noriega-Araníbar, Universidad de Lima, Perú

<https://orcid.org/0000-0001-6824-1415>

EDITOR ASOCIADO

Edilberto Miguel Avalos Ortecho, Universidad de Lima, Perú

<https://orcid.org/0000-0003-0939-634X>

ASISTENTE EDITORIAL

Alexandra Ariana Solar Arenas

Nicolle Nahomi Romero Catalan

© Universidad de Lima

Fondo Editorial

Av. Javier Prado Este 4600

Urb. Fundo Monterrico Chico

Santiago de Surco, Lima, Perú

Código postal 15023

Teléfono (511) 437-6767, anexo 30131

[fondoeditorial@ulima.edu.pe](mailto:fondoeditorial@ulima.edu.pe)

[www.ulima.edu.pe](http://www.ulima.edu.pe)

Edición, diseño, diagramación y carátula: Fondo Editorial de la Universidad de Lima

Publicación semestral

Los trabajos firmados son de responsabilidad de los autores.

*Ingeniería Industrial* se publica bajo la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY)

ISSN 2523-6326 (en línea)

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú n.º 2020-08605

## COMITÉ EDITORIAL

Gabriela Laura Gallardo, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0003-1426-8430>

Wilfredo Román Hernández Gorriti, Universidad de Lima, Perú  
<https://orcid.org/0000-0002-6122-4935>

Silvia Ponce Álvarez, Universidad de Lima, Perú  
<https://orcid.org/0000-0003-1583-7113>

José Luis Zayas-Castro, University of South Florida, Estados Unidos  
<https://orcid.org/0000-0001-7374-3479>

Marcos Leandro Silva Oliveira, Universidad de la Costa, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-7771-5085>

Hugo Romero-Bonilla, Universidad Técnica de Machala, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0002-7846-0512>

Neyfe Sablón-Cossío, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0002-6691-0037>

Marco Antonio Díaz Martínez, Tecnológico Nacional de México  
<https://orcid.org/0000-0003-1054-7088>

Clara Inés Pardo Martínez, Universidad del Rosario, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-8556-319X>

## COMITÉ CIENTÍFICO

Dra. Ruth Isabel Murrugarra Munares, Universidad Adolfo Ibáñez, Chile  
<https://orcid.org/0000-0002-7043-7983>

Dr. Igor Lopes-Martínez, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba  
<https://orcid.org/0000-0002-1249-8833>

Dra. Maria Julia Brunette, The Ohio State University, Estados Unidos  
<https://orcid.org/0000-0001-7932-5964>

Dra. María Lau, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú  
<https://orcid.org/0000-0001-9058-7789>

Dr. Fabricio Paredes-Larroca, Universidad de Lima, Perú  
<https://orcid.org/0000-0001-8857-9253>

Dr. Alberto Edel León, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-2260-3086>

Dr. Alexandre Carlos Brandão Ramos, Universidade Federal de Itajubá, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0001-8844-5116>

Dra. Martha Ruth Manrique Torres, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-3870-4965>

Dr. Yonni Angel Cuero-Acosta, Universidad del Rosario, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0001-9565-3968>

Dr. Lei Zhao, Tsinghua University, China  
<https://orcid.org/0000-0002-1028-9632>

Dr. Iara Tammela, Universidade Federal Fluminense, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0002-8914-6326>

Dra. Marcela Amaro Rosales, Universidad Nacional Autónoma de México,  
Instituto de Investigaciones Sociales, México  
<https://orcid.org/0000-0002-1647-8901>

Dr. Felipe Schoemer Jardim, Universidade Federal Fluminense, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0001-9066-887X>

Dr. Hector Enrique Gonzales Mora, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú  
<https://orcid.org/0000-0002-8455-3432>

Dr. Daniel Eduardo Lazo Martinez, Curtin University, Australia  
<https://orcid.org/0000-0003-1757-5444>

Dr. Gibrán Sayeg Sánchez, Tecnológico de Monterrey, México  
<https://orcid.org/0009-0009-6694-6142>

Dr. Wilfredo Yushimito, Instituto Politécnico Rensselaer, Estados Unidos  
<https://orcid.org/0000-0002-5528-2477>

Dra. Carmen Pérez-Camino, Universidad de Sevilla, España  
<https://orcid.org/0000-0001-7652-9582>

Dr. S. Nallusamy, Jadavpur University, India  
<https://orcid.org/0000-0003-1446-3332>

Dr. Joaquín Julián Pastor Pérez, Universidad Miguel Hernández, España  
<https://orcid.org/0000-0002-3065-2494>

## COMITÉ EVALUADOR

Aldo Joao Cárdenas Oscanoa	Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú
Arturo Sánchez Carmona	Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México
Cesar Rogelio Cam Gensollen	Universidad de Lima, Perú
Claudia Alvarado Osuna	Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, México
Claudia León Chavarri	Universidad de Lima, Perú
Eduardo López Sandoval	Universidad de Lima, Perú
Edwin Alberto Garavito Hernández	Universidad Industrial de Santander, Colombia
Ezilda Cabrera	Universidad de Lima, Perú
Fabrizio Paredes-Larroca	Universidad de Lima, Perú
Fiorella Capcha Sanchez	Universidad de Lima, Perú
Freddy Andrés Pérez Mantilla	Universidad Antonio Nariño, Colombia

George Power Porto	Universidad de Lima, Perú
Guillermo Arturo Davies Oré	Universidad de Lima, Perú
Humberto Ayala Armijos	Universidad Técnica de Machala, Ecuador
Idalia Flores de la Mota	Universidad Nacional Autónoma de México
Iván Juan Carlos Pérez Olgúin	Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
Jaime Antero Arango	Universidad Nacional de Colombia
Javier Arias Osorio	Universidad Industrial de Santander, Colombia
Jordi Fortuny-Santos	Universidad Politécnica de Cataluña, España
Jorge Antonio Corzo Chávez	Universidad de Lima, Perú
José Antonio Taquía Gutiérrez	Universidad de Lima, Perú
José Roberto Grande Ramírez	Instituto Tecnológico de Orizaba, México
Juan Carlos Yacono Llanos	Universidad de Lima, Perú
Juan Manuel Machuca de Pina	Universidad de Lima, Perú
Julio Cesar Gonzalez Silva	Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia
Julio Ramos Ramírez	Universidad de Lima, Perú
Kelvin Howard Pizarro Romero	Universidad Técnica de Machala, Ecuador
Laura Mansilla Pérez	Universidad de Lima, Perú
Lizbet León Félix	Universidad de Lima, Perú
Luis Montesinos	Universidad de Lima, Perú
Manuel Fernando Montoya Ramirez	Universidad de Lima, Perú
Manuel Luis Chilca Alva	Universidad de Lima, Perú
Marco Henrich Saavedra	Universidad de Lima, Perú
María del Rocío Ávila Gonzáles	Universidad de Lima, Perú
Mario Guillermo Otero Mostacero	Universidad de Lima, Perú
Merssy Luisa Quispe Velásquez	Universidad de Lima, Perú
Mirna Estarrón Espinosa	Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, México
Nancy Lis García	Universidad de Buenos Aires, Argentina
Nicolás Francisco Salazar Medina	Universidad de Lima, Perú
Orlando Mauricio Durán Acevedo	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile
Richard Meza Ortiz	Universidad de Lima, Perú
Silvia Ponce Álvarez	Universidad de Lima, Perú
Teresa María Garcés Cabrera	Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra, República Dominicana
Víctor Velázquez Martínez	Universidad Veracruzana, México
Virna Angélica Ortiz Araya	Universidad del Bío-Bío, Chile
Wilfredo Román Hernández Gorritti	Universidad de Lima, Perú
Yadira Aracely Fuentes-Rubio	Universidad Autónoma de Tamaulipas, México

# ÍNDICE

PRESENTACIÓN / FOREWORD	11
GESTIÓN DE LA PRODUCCIÓN / PRODUCTION MANAGEMENT	15
Comparative Ergonomic Risk Assessment of Manual Handling Tasks in a Small-Scale Water Bottling Operation Using RULA and ERIN	17
<i>Reina Verónica Román Salinas, Marco Antonio Díaz Martínez, Víctor Hugo Tobías Martínez, Edgar Jearvavi Vázquez Moreno, Rubén Jérez Calderón</i>	
Efecto del mantenimiento autónomo y la eliminación de pérdidas en la sostenibilidad económica: un modelo SEM	36
<i>José Darío Vásquez Martínez, Jorge Luis García Alcaraz, José Luis Peinado Portillo</i>	
Enhancing Productivity and Minimizing Welding Defects in Steel Mesh Manufacturing through the Implementation of a Physical Poka-Yoke Device	55
<i>Jesús Cruz Garza Moreno, Luz Idalia Balderas García, Yadira Aracely Fuentes Rubio, Azahel Treviño Villegas, Lourdes Yajaira García Rivera</i>	
Marco estratégico-táctico integrado para el diseño de cadenas de suministro agroalimentarias de exportación mediante un enfoque de optimización MILP multiperiodo	76
<i>Erberth Cruz Paredes</i>	
Optimización de la gestión de líneas de producción mediante la automatización de captura de datos y sistemas SCADA en tiempo real	103
<i>Ali José Céspedes Vera</i>	
Discrete-Event Simulation of the Cocoa Value Chain in Puerto Asís, Colombia: Comparative Effects of Technification and Workforce Scaling	121
<i>James Mauricio Enríquez Rodríguez, Mónica Lizeth Sánchez Arévalo</i>	

<b>CALIDAD Y MEDIO AMBIENTE / QUALITY AND ENVIRONMENT</b>	<b>149</b>
Valorización de valvas de <i>Argopecten purpuratus</i> en la formulación de jabón exfoliante para reducir residuos en Piura	151
<i>Jocellyn Nallely Peña Jimenez, Ubaldo Iair Trelles Salazar, Gabriel Ernesto Borrero Carrasco</i>	
Mejora para reducir la tasa de rechazo de piezas defectuosas en una empresa de naves industriales del sector metalmeccánico aplicando SPC, TPM y 5S	176
<i>Noemi Yasmin Carita Galindo, Nicole Nahomi Villanueva Alarcón, Wilson David Calderón Gonzales</i>	
Experimental Analysis of Industrial Packaging for <i>Chicha de Jora</i> in Laminated Cardboard	199
<i>Marco Antonio Guardamino Castro, Marcos Luis Humberto Sánchez Ferrer Marengo, Marcos Fernando Ruiz-Ruiz</i>	
Selección óptima de proveedores mediante análisis de confiabilidad y costos basado en la distribución de Weibull aplicado al sector automotor	218
<i>Juan Manuel Izar Landeta, Ivanna López Reyna</i>	
<b>INGENIERÍA DE NEGOCIOS / BUSINESS ENGINEERING</b>	<b>235</b>
Diseño de un modelo de gestión estratégica basado en <i>balanced scorecard</i> para la mejora del desempeño institucional en una institución de educación básica privada en Colombia	237
<i>David Enrique Uribe Suarez, Yeris Baquero Bolaños, José Ricardo Fuentes Jaramillo</i>	
<b>CIENCIA Y TECNOLOGÍA / SCIENCE AND TECHNOLOGY</b>	<b>261</b>
Evaluación del efecto de adición de peróxido de hidrógeno como agente oxidante en el proceso de lixiviación cianurada para mejorar la extracción de oro	263
<i>Washington Omar Espinoza Ramon, Braulio Absalón Madrid Celi, Gary Hitler Muñoz Bravo, Carmín Aydee de Gracia Pérez, Susana Elizabeth Blacio Toro</i>	
Producción y optimización de celulosa bacteriana a partir de jugo de raquis de banano ( <i>Musa spp.</i> ) pretratado con ozono mediante diseño Box-Behnken	281
<i>Andres Joel Zeas Sesme, Thaily Jazmin Martínez Castillo, Manuel Alejandro Fiallos Cárdenas</i>	
<b>DATOS DE LOS AUTORES</b>	<b>307</b>



# PRESENTACIÓN

Alcanzar la edición 50 de la revista *Ingeniería Industrial* constituye un logro significativo que refleja el compromiso permanente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Lima con la investigación, la innovación y la difusión del conocimiento científico. La primera edición de la revista, publicada en 1992, fue encargada al Centro de Investigación de la Producción Industrial (CIPi), bajo la dirección del doctor Aquiles Apéstegui, con el fin de dar a conocer los últimos adelantos técnicos en los campos de la facultad: tecnología, gestión, producción y sistemas.

En el transcurso de los años, se ha impulsado una mejora continua de los procesos de la revista con el fin de lograr una mayor presencia en bases de datos internacionales. Como parte de ello, se pasó de publicar una sola edición anual a dos números por año; asimismo, se dejó de contar con ediciones impresas y digitales para disponer únicamente de una versión digital, y se incorporaron números especiales en apoyo de los congresos internacionales organizados por la carrera de Ingeniería Industrial. Sin embargo, aún existen nuevos retos por alcanzar, como ampliar la presencia de la revista en otras bases de datos internacionales para aumentar las citaciones de los artículos publicados.

El comité editorial de la revista reafirma su compromiso con la calidad científica y la ética mediante procesos editoriales rigurosos y transparentes, con el apoyo de pares académicos que evalúan los trabajos bajo criterios científicos y metodológicos que contribuyen al fortalecimiento de esta especialidad de la ingeniería. Por esta razón, en esta edición se presentan 13 artículos, seleccionados de un total de 49 trabajos recibidos desde la convocatoria del *call for papers* realizada este año.

La presente edición reúne investigaciones sobre la evaluación comparativa de riesgos ergonómicos en tareas manuales, priorizando el bienestar humano; la simulación de eventos discretos para el análisis de procesos; el diseño de la cadena de suministro mediante modelos MILP para la optimización de modelos complejos; el análisis de la confiabilidad basado en la distribución de Weibull para la selección de proveedores y

el aseguramiento de la calidad de los materiales; así como la gestión ambiental orientada al aprovechamiento de los residuos para la elaboración de un producto, entre otros temas.

Ser parte de esta trayectoria editorial representa no solo un honor institucional, sino también una gran responsabilidad para alcanzar la excelencia académica y la construcción colectiva del conocimiento.

*Dra. María Teresa Noriega-Aranibar*  
Editora

# FOREWORD

The publication of the fiftieth issue of *Ingeniería Industrial* marks a significant milestone in the history of the journal and stands as a testament to the University of Lima's Faculty of Engineering's sustained commitment to research, innovation, and the dissemination of scientific knowledge.

The journal's first issue was published in 1992 under the responsibility of the Center for Industrial Production Research –Centro de Investigación de la Producción Industrial, CIPI–, and had Dr. Aquiles Apéstegui as its first editor. Its purpose was to share the latest technical developments in the areas central to the Faculty's academic work: technology, management, production, and systems.

Over the years, the journal has undergone a process of continuous improvement. These efforts have strengthened its editorial practices and expanded its presence in international databases. The journal moved from publishing one issue per year to publishing two; from a combined print and digital format to a fully digital presence; and, at different moments, it has also published special issues in connection with the international conferences organized by the Industrial Engineering program. Important challenges remain, however, particularly the need to further increase the journal's visibility in international indexing systems and to enhance the citation impact of the articles it publishes.

The Editorial Committee reaffirms its commitment to scientific quality and publication ethics through rigorous and transparent editorial processes, supported by academic peer review and guided by sound scientific and methodological criteria. These principles contribute to the consolidation and development of industrial engineering as a field of knowledge. In this anniversary issue, the journal publishes 13 articles selected from the 49 submissions received in response to this year's call for papers.

This issue brings together studies on a wide range of topics, including the comparative assessment of ergonomic risks in manual tasks, with an emphasis on human well-being; the use of discrete-event simulation to analyze processes; supply chain design through MILP models for the optimization of complex systems; reliability analysis using

the Weibull distribution to support supplier selection and ensure material quality; and environmental management approaches that promote the valorization of waste in the development of new products, among other contributions.

This milestone is both a source of institutional pride and a renewed responsibility. It strengthens our commitment to academic excellence and to the collective construction of knowledge.

*Dr. María Teresa Noriega-Aranibar*  
*Editor*

**GESTIÓN  
DE LA PRODUCCIÓN**  

---

**Production Management**



# COMPARATIVE ERGONOMIC RISK ASSESSMENT OF MANUAL HANDLING TASKS IN A SMALL-SCALE WATER BOTTLING OPERATION USING RULA AND ERIN

REINA VERÓNICA ROMÁN SALINAS\*

<https://orcid.org/0000-0001-9287-4298>

Facultad de Ingeniería Industrial,  
Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, México

MARCO ANTONIO DÍAZ MARTÍNEZ

<https://orcid.org/0000-0003-1054-7088>

Facultad de Ingeniería Industrial,  
Tecnológico Nacional de México, México

VÍCTOR HUGO TOBIÁS MARTÍNEZ

<https://orcid.org/0009-0003-3555-1793>

Área de Ingeniería y Ciencias,  
Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas, México

EDGAR JEARVA VÍZQUEZ MORENO

<https://orcid.org/0000-0002-3267-1445>

Facultad de Ingeniería Industrial,  
Tecnológico Nacional de México, México

RUBÉN JÉREZ CALDERÓN

<https://orcid.org/0009-0001-4778-2914>

Facultad de Ingeniería Industrial,  
Tecnológico Nacional de México, México

Received: March 17, 2026 / Accepted: April 23, 2026

Published: June 15, 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8671>

**ABSTRACT.** Musculoskeletal disorders (MSDs) rank among the leading causes of occupational morbidity in manufacturing environments that demand high physical exertion. This

---

This research received no external funding.

\* Corresponding author.

Author e-mails in order of appearance: [reina.roman@itspanuco.edu.mx](mailto:reina.roman@itspanuco.edu.mx), [marco.diaz@itspanuco.edu.mx](mailto:marco.diaz@itspanuco.edu.mx), [victor\\_tobias.ed@icest.mx](mailto:victor_tobias.ed@icest.mx), [edgar.vazquez@itspanuco.edu.mx](mailto:edgar.vazquez@itspanuco.edu.mx), [ruben.jerez@itspanuco.edu.mx](mailto:ruben.jerez@itspanuco.edu.mx)

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

study presents a comparative ergonomic risk assessment across five workstations at a small-scale water purification plant in Mexico, utilizing the RULA and ERIN assessment methods. We conducted a quantitative, non-experimental, cross-sectional analysis focusing on manual tasks involved in washing, rinsing, filling, sealing, and transporting 20 kg water containers. The ERIN method classified three workstations as high risk, with scores ranging from 28 to 35, while the RULA method identified one workstation as very high risk and two as high risk. The highest prevalence of musculoskeletal symptoms occurred in the wrist/hand (60 %) and lower back (55 %). The agreement between the two assessment methods facilitated the identification of critical factors related to arm posture, effort intensity, and work pace, thereby supporting the implementation of low-cost ergonomic interventions aimed at reducing the risk of MSDs.

KEYWORDS: ergonomic risk assessment / manual material handling / work-related musculoskeletal disorders / cumulative trauma disorders / RULA / ERIN

## EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL RIESGO ERGONÓMICO EN TAREAS DE MANIPULACIÓN MANUAL EN UN PROCESO DE EMBOTELLADO DE AGUA A PEQUEÑA ESCALA UTILIZANDO RULA Y ERIN

RESUMEN. Los trastornos musculoesqueléticos (TME) constituyen una de las principales causas de morbilidad ocupacional en entornos de manufactura con altas demandas físicas. Este estudio realizó una evaluación comparativa del riesgo ergonómico en cinco estaciones de trabajo de una planta purificadora de agua en México mediante los métodos RULA y ERIN. Se desarrolló un estudio cuantitativo, no experimental y transversal, evaluando tareas de lavado, enjuague, llenado, sellado y transporte de garrafones de 20 kg. Los resultados de ERIN clasificaron tres estaciones en nivel de riesgo alto, con puntuaciones entre 28 y 35, mientras que RULA identificó una estación con riesgo muy alto y dos con riesgo alto. La mayor prevalencia de síntomas musculoesqueléticos se registró en muñeca/mano (60 %) y región lumbar (55 %). La concordancia entre ambos métodos permitió identificar factores críticos relacionados con postura del brazo, intensidad del esfuerzo y ritmo de trabajo, facilitando intervenciones ergonómicas de bajo costo.

PALABRAS CLAVE: evaluación del riesgo ergonómico / manipulación manual de materiales / trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo / trastornos por trauma acumulativo / RULA / ERIN

## INTRODUCTION

Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) represent one of the most significant occupational health challenges globally. These conditions primarily arise from prolonged exposure to ergonomic risk factors, including awkward postures, repetitive movements, manual material handling, and sustained physical exertion during work tasks. Research has consistently shown that tasks involving manual material handling constitute a major source of biomechanical risk in production processes characterized by low levels of automation. This risk stems from the interplay of physical exertion, demanding postures, and repetitive movements, all of which increase the likelihood of developing musculoskeletal disorders among workers (Graziosi et al., 2024; Soares et al., 2026; Yang et al., 2023). Consequently, WMSDs serve as one of the leading causes of work-related disability and diminished productivity across various industrial sectors.

In this context, ergonomics serves a pivotal role in preventing occupational injuries and enhancing working conditions. This discipline specifically analyzes the interactions among workers, tools, and the work environment, aiming to design work systems that align with human capabilities while simultaneously promoting safety, well-being, and productivity. Systematic ergonomic assessments identify biomechanical risk factors and enable the development of intervention strategies to reduce the incidence of musculoskeletal disorders among workers (Demissie et al., 2024).

Among the tools used for ergonomic workstation evaluation, observational postural analysis methods have found extensive application in industrial environments to assess biomechanical exposure associated with various work tasks. Numerous studies have employed these methods to analyze postural load and musculoskeletal risks in manual material handling tasks, thereby demonstrating their effectiveness in identifying critical postures and suggesting ergonomic improvements in the workplace (Ansari & Sheikh, 2014; Conforti et al., 2019). A predominant method in this context is the Rapid Upper Limb Assessment (RULA), which facilitates the analysis of biomechanical load primarily affecting the upper limbs, neck, and trunk during task performance. RULA assigns risk scores based on the postures adopted by the worker, thus enabling the identification of situations that necessitate ergonomic intervention to prevent musculoskeletal injuries (McAtamney & Corlett, 1993; Muhacir et al., 2022).

The scientific literature indicates that observational methods rank among the most prevalent approaches for evaluating biomechanical workload in occupational settings, as they facilitate a systematic analysis of postural exposure, applied force, and movement repetition. However, no singular method adequately characterizes ergonomic exposure; thus, employing multiple assessment tools is advisable to achieve more comprehensive ergonomic evaluations (Takala et al., 2010).

Additionally, researchers developed the Ergonomic Risk Index (ERIN) as a comprehensive tool for assessing exposure to ergonomic risks associated with tasks that have a high physical demand. This tool considers variables related to posture, movement frequency, manual handling, and workplace conditions.

In conjunction with postural assessment tools, ergonomic studies frequently incorporate epidemiological instruments to analyze musculoskeletal symptoms in the working population. One of the most widely utilized instruments in this domain is the Nordic Musculoskeletal Questionnaire (NMQ), which assesses the prevalence of discomfort or pain in various body regions over specific time periods. The NMQ questionnaire has gained recognition as a well-validated tool in occupational health studies, owing to its capacity to correlate the incidence of musculoskeletal symptoms with working conditions and ergonomic risks (Crawford, 2007; Kuorinka et al., 1987).

Numerous studies in industrial settings reveal that a significant proportion of workers perform tasks under unfavorable ergonomic conditions, which heightens the risk of developing musculoskeletal disorders over time. Specifically, postural analyses utilizing observational methods indicate that many workers operate at moderate to high-risk levels. This finding underscores the need to implement corrective measures to improve workstation design and mitigate exposure to biomechanical risk factors (Grooten & Johansson, 2018; Yazdanirad et al., 2018).

Despite the expanding body of research in occupational ergonomics, there remains a need for studies that integrate observational and epidemiological tools to enhance the understanding of ergonomic risks, particularly in small-scale production processes that involve intensive manual material handling. Moreover, recent investigations have utilized sensor-based technologies, such as inertial measurement systems, to augment ergonomic assessments and improve the identification of musculoskeletal risk factors in occupational settings (Baklouti et al., 2024).

In this context, this study seeks to evaluate ergonomic risks by applying the RULA method and the ERIN index, and to analyze the prevalence of musculoskeletal symptoms with the Nordic Musculoskeletal Questionnaire (NMQ). The goal is to identify key risk factors and propose strategies for improving occupational health and safety.

## **METHODOLOGY**

This study employed a quantitative, non-experimental approach characterized by a cross-sectional design and a descriptive–comparative scope. The non-experimental design enabled assessment of ergonomic conditions in the work environment without the manipulation of independent variables, while the cross-sectional perspective facilitated the analysis of workers' postural exposure at a specific stage in the production process.

The comparative component of the study utilized the concurrent application of the RULA and ERIN methods to analyze similarities and potential differences in the classification of ergonomic risk associated with the evaluated work tasks. This methodological approach enhances the ability to compare the sensitivity of both methods concerning the characteristics of a production system marked by low levels of automation and a high degree of manual handling, conditions frequently observed in small-scale production units.

The researchers conducted the study in a water purification plant located in Mexico, characterized by predominantly manual operations and limited process automation. The production process comprises five primary operational stages: container internal cleaning, rinsing, filling, sealing (capping), and transport and storage. Tasks at these stations require manual handling of water containers weighing approximately 20 kg, as well as repetitive movements, trunk flexion, and sustained physical effort.

The analysis focuses on the postures adopted by operators during the execution of critical tasks within the work cycle, particularly those that impose heightened biomechanical demands.

Each workstation underwent a thorough analysis that considered the specific biomechanical challenges associated with task execution. At the internal cleaning and rinsing stations, operators engaged in repetitive upper limb movements characterized by shoulder flexion and extension, wrist deviation, and sustained trunk inclination. The filling station required moderate arm elevation, low force exertion, and minimal trunk involvement. At the labeling and sealing station, operators exhibited repetitive wrist flexion-extension and forearm pronation-supination. Finally, the transport station required manual handling of approximately 20 kg containers, involving trunk flexion, load lifting, and displacement while adopting asymmetric postures.

To assess the ergonomic conditions of the production process, this study utilized three complementary instruments: the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) method, the Ergonomic Risk Index (ERIN), and the Nordic Musculoskeletal Questionnaire. Each tool facilitated the evaluation of different dimensions of ergonomic risk and musculoskeletal symptomatology among workers. The relationship between the instruments employed and the variables analyzed is presented in Table 1.

Extensive validation in the scientific literature supports the use of observational methods for ergonomic risk assessment. These approaches enable the evaluation of biomechanical exposure through systematic observations of workers' postures, movement frequency, and the physical demands associated with various work tasks. According to Takala et al. (2010), these observational methods serve as practical and reliable tools for identifying risk factors for musculoskeletal disorders, especially in production environments characterized by low levels of automation, where direct instrumental measurement is often limited.

Building upon this methodological framework, the present study employs a combined application of the RULA and ERIN methods to assess postural load and evaluate the level of exposure to ergonomic risk throughout various stages of the production process. Furthermore, the analysis incorporates the Nordic Musculoskeletal Questionnaire to identify symptoms associated with musculoskeletal disorders.

**Table 1**  
*Instruments used for the assessment of ergonomic studies*

Method	Type of assessment	Variables evaluated
RULA	Observational postural assessment	Postural assessment of the neck, trunk, upper limbs (arms and wrists), and legs
ERIN	Ergonomic risk index	Movements of the trunk, arms, wrists, and neck; work pace; level of physical effort; and worker self-perception
Nordic Musculoskeletal Questionnaire (NMQ)	Epidemiological symptom assessment	Presence of pain or discomfort in nine body regions over the past 12 months and the last 7 days

*Note.* Based on “Standardised nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms,” by I. Kuorinka, B. Jonsson, A. Kilbom, H. Vintenber, F. Biering-Sørensen, G. Andersson, and K. Jørgensen, 1987, *Applied Ergonomics*, 18(3), and “The Rapid Upper Limb Assessment (RULA): A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders,” by L. McAtamney and E. N. Corlett, 1993, *Applied Ergonomics*, 18(3).

The Rapid Upper Limb Assessment (RULA) method evaluates the postural load affecting the upper limbs, neck, trunk, and legs during task performance. Developed by McAtamney and Corlett (1993), this method is an observational tool for identifying risk factors associated with work-related musculoskeletal disorders.

The application procedure consists of several stages: first, direct observation of activities at each workstation; second, photographic documentation of representative postures throughout the work cycle; third, identification of the most critical or unfavorable posture within each task; fourth, scoring based on the original RULA assessment tables; and finally, determination of the corresponding action level. Researchers categorized the final scores according to the method’s established levels, with the corresponding RULA action level classification presented in Table 2.

The application of RULA and ERIN involved a combination of direct observation and photographic recording. While photographs supported the documentation of representative postures; scoring primarily relied upon in-situ observation, facilitating the assessment of movement dynamics, work pace, and physical effort.

**Table 2***RULA Method Rating Scale*

Score	Category	Description
1-2	Acceptable posture	The evaluated posture does not pose a significant ergonomic risk and does not require immediate intervention.
3-4	Requires revision	The posture exhibits potential risk factors; therefore, a more comprehensive workstation analysis is recommended.
5-6	Changes needed soon	The posture reflects a moderate to high risk level; thus, ergonomic modifications should be implemented in the short term.
7	Immediate intervention	The posture poses a significant ergonomic risk; thus, it is imperative to intervene in workstation design or work methods.

Note. Adapted from "The Rapid Upper Limb Assessment (RULA): A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders," by L. McAtamney and E. N. Corlett, 1993, *Applied Ergonomics*, 18(3).

The Ergonomic Risk Index (ERIN) method serves as a complementary tool for assessing cumulative exposure to ergonomic risk associated with task execution. This method integrates seven key variables related to biomechanical exposure: trunk movement, arm movement, wrist movement, neck movement, work pace, level of physical effort, and worker self-perception.

Researchers evaluated each variable using the method's predefined scale, which yields a cumulative score that facilitates the classification of ergonomic risk into four categories. The ERIN risk classification is detailed in Table 3.

**Table 3***Classification of ergonomic risks according to the ERIN method*

Score	Risk level	Explanation
7-14	Low	The postural and physical demands associated with the work do not pose a significant health risk.
15-23	Medium	Ergonomic factors exist that may contribute to musculoskeletal discomfort over time.
24-35	High	The work conditions involve substantial exposure to biomechanical risk factors, necessitating intervention.
35	Very high	There is a high likelihood of developing musculoskeletal disorders, which warrants immediate corrective actions.

Note. Adapted from "Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work," by E. P. Takala, I. Pehkonen, M. Forsman, G. Hansson, S. Mathiassen, W. Neumann, G. Sjøgaard, K. Veiersted, R. Westgaard, and J. Winkel, 2010, *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 36(1).

The inclusion of worker self-perception enhances objective biomechanical assessment, a factor recognized in ergonomic research as crucial for identifying occupational risks (Oakman et al., 2017).

To complement this analysis, researchers administered the Nordic Musculoskeletal Questionnaire (NMQ), a widely utilized tool in occupational health research for assessing the prevalence of musculoskeletal symptoms across various anatomical regions.

The Nordic Musculoskeletal Questionnaire was applied prior to implementing any ergonomic interventions to establish a baseline for identifying the prevalence of musculoskeletal symptoms associated with current working conditions.

The questionnaire facilitated the identification of pain, discomfort, or musculoskeletal symptoms in nine main anatomical regions. Table 4 presents the evaluated body regions.

**Table 4**

*Assessment of anatomical regions utilizing the Nordic Musculoskeletal Questionnaire*

Anatomical region	Definition	Description
Neck	Cervical region	Evaluates discomfort associated with sustained or inclined neck postures.
Shoulders	Scapulohumeral joints	Identifies pain linked to repetitive arm elevation or load handling.
Elbows	Elbow joints	Assesses discomfort resulting from repetitive motion or applied force.
Wrists/Hands	Distal upper limbs	Identifies discomfort associated with gripping, handling, or repetitive movements.
Upper back	Thoracic region	Evaluates discomfort related to flexed or twisted trunk postures.
Lower back	Lumbar region	Identifies pain associated with manual material handling and trunk flexion.
Hips/Thighs	Pelvic and femoral region	Assesses the discomfort associated with prolonged postures or lifting tasks.
Knees	Knee joints	Identifies the discomfort related to repetitive flexion or bodily load.
Ankles/Feet	Distal lower limbs	Evaluates the discomfort associated with prolonged standing.

*Note.* Adapted from "Standardised nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms," by I. Kuorinka, B. Jonsson, A. Kilbom, H. Vintenber, F. Biering-Sørensen, G. Andersson, and K. Jørgensen, 1987, *Applied Ergonomics*, 18(3)

The evaluation of musculoskeletal symptoms occurred over two timeframes: the preceding 12 months and the last 7 days. This instrument has demonstrated high levels of reliability and validity in epidemiological studies aimed at identifying work-related musculoskeletal disorders (Crawford, 2007; Kuorinka et al., 1987).

The methodological procedure comprised four main stages:

1. Production process assessment: Researchers conducted initial observations at the selected workstations, identifying critical tasks and the periods of highest physical demand within the production cycle.
2. Observational recording: Researchers captured photographic documentation of worker postures during task execution at each workstation.
3. Application of ergonomic methods: Calculations for RULA and ERIN scores were performed independently for each workstation.
4. Comparative analysis: The risk levels obtained from both methods were compared to identify the similarities and differences in ergonomic risk classification.

To ensure consistency, the analysis focused on postures that correspond with instances of highest physical demand within the operational cycle.

The data analysis involved calculating individual scores for each workstation according to the different assessment methods. Researchers classified risk levels based on established criteria, and conducted qualitative comparisons of recommended action levels, and identified workstations with the greatest agreement in high or very high-risk classifications.

This approach facilitated the evaluation of each method's ability to detect ergonomic risks in a small-scale, low-automation production system.

Participation in the study was voluntary for workers, and the confidentiality of the collected information was strictly upheld. The study was conducted solely for academic and ergonomic improvement purposes, ensuring that participants' employment conditions or performance evaluations remained unaffected.

## RESULTS

The implementation of the Ergonomic Risk Index (ERIN) facilitated the identification of the overall ergonomic risk associated with tasks performed at the five workstations within the production process. The findings demonstrated variability in risk exposure between work stations: those involving intensive manual handling of water containers and those requiring lower levels of physical demand. The scores for each workstation are presented in Table 5.

The results demonstrate that three out of the five evaluated workstations (1, 2, and 5) are categorized as high-risk, underscoring the necessity for immediate corrective measures. In contrast, the filling station exhibits the lowest risk level, while the labeling and sealing tasks are classified in a moderate risk range.

**Table 5**  
*Classification of ergonomic risks using the ERIN method*

Station	Activity	ERIN Score	Risk level
1	Internal cleaning	28	High
2	Rinsing	35	High
3	Filling	14	Low
4	Labeling and sealing	17	Medium
5	Transport	30	High

A variable-specific analysis reveals that the primary contributors to the total score include arm posture and movement frequency, followed by physical effort and work pace, particularly observed while analyzing activities at the cleaning and transport stations.

The Rapid Upper Limb Assessment (RULA) method assessed the instantaneous postural load associated with tasks performed at each workstation, with particular emphasis on upper limb exposure. The results are presented in Table 6.

**Table 6**  
*Postural evaluation utilizing the RULA method*

Station	Activity	RULA Score	Risk level
1	Interior cleaning	6	High
2	Rinse	6	High
3	Filling	4	Medium
4	Labeling and sealing	4	Medium
5	Transportation	7	Very high

The transport station manifested the highest risk level, necessitating immediate intervention. Likewise, the cleaning and rinsing stations require short-term ergonomic modifications. A segmented analysis identified the anatomical regions most impacted by postural load, specifically the wrist, forearm, and upper arm.

To identify consistencies and discrepancies in ergonomic risk classification, the researchers conducted a comparative analysis between the two methods. The results are presented in Table 7.

**Table 7**

*A comparative analysis of the ERIN and RULA methods*

Station	ERIN Score	ERIN Level	RULA Score	RULA Level	Concordance
1	28	High	6	High	Yes
2	35	High	6	High	Yes
3	14	Low	4	Medium	Partial
4	17	Medium	4	Medium	Yes
5	30	High	7	Very High	Yes (Critical)

Alignment between both methods occurred in four out of the five workstations, while one workstation exhibited partial consistency. The primary discrepancy arose in the filling station, where ERIN classified the risk as low, whereas RULA indicated a moderate level of risk. This divergence can be attributed to methodological differences between the two tools; RULA emphasizes instantaneous postural assessment, whereas ERIN considers cumulative ergonomic risk exposure.

Building on the comparative findings from ERIN and RULA, researchers developed a graphical representation of the workstations evaluated to illustrate the postures, movements, and ergonomic risk levels identified at each stage of the production process. This representation is presented in Figure 1.

**Figure 1**

*Comparative evaluation of ergonomic risk across workstations utilizing the ERIN and RULA methods.*



*Note.* The figure illustrates the five stages of the production process: internal cleaning, rinsing, filling, labeling and sealing, and transport/storage. The arrows highlight the primary postural movements observed during the execution of these tasks. The risk levels reflect the scores obtained from the ERIN and RULA applications.

The analysis identified the need for ergonomic interventions to reduce biomechanical risk exposure at the most critical workstations. Table 8 presents the projected improvements estimated using the ERIN method.

**Table 8**

*Anticipated reduction in ergonomic risk by making operational improvements*

Station	Current Score	Projected Score	Change in risk level
1	28	14	High → Low
2	35	14	High → Low
5	30	22	High → Medium

*Note.* The authors provide an elaboration based on the expected outcomes if ergonomic interventions are implemented.

The proposed interventions include incorporating semi-automated bottle-washing systems to reduce repetitive manual scrubbing, implementing of conveyor- or roller-based transport systems to reduce manual load handling, and using mechanical lifting aids, such as lever systems or platforms, to facilitate container movement. Furthermore, it is essential to redesign workstations to optimize working height and reduce trunk flexion angles, thereby decreasing biomechanical strain on workers.

To identify the presence of musculoskeletal symptoms among workers, researchers administered the Nordic Musculoskeletal Questionnaire as a screening tool. The most frequently reported body regions included the wrist/hand, forearm, shoulder, and lower back.

The areas exhibiting the highest prevalence of symptoms corresponded to workstations classified as high or very-high-risk according to both the ERIN and RULA assessments, particularly in cleaning, rinsing, and transport tasks. At the transport station, multiple workers reported lower back discomfort due to the repetitive handling of approximately 20-kg containers. In contrast, the filling station, which ERIN classified as low risk, demonstrated a lower frequency of reported symptoms, indicating a consistency between observational ergonomic assessments and workers' perceived discomfort.

Table 9 presents the prevalence of musculoskeletal symptoms identified through the Nordic Musculoskeletal Questionnaire.

**Table 9**

*Assessment of the musculoskeletal symptoms reported using the Nordic Musculoskeletal Questionnaire*

Body region	Last 12 months (%)	Last 7 days (%)
Neck	25	10
Shoulder	40	20
Wrist/Hand	60	35
Lower back	55	30

*Note.* This study utilizes data collected through the application of the Nordic Musculoskeletal The questionnaire (NMQ) was administered to workers at the water purification plant. The methodology is adapted from "Standardised nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms," by I. Kuorinka, B. Jonsson, A. Kilbom, H. Vintenberg, F. Biering-Sørensen, G. Andersson, and K. Jørgensen, 1987, *Applied Ergonomics*, 18(3).

## DISCUSSION

The study's findings reveal that workstations requiring intensive manual handling of loads present the highest levels of ergonomic risk. This observation aligns with prior research that links repetitive lifting and sustained trunk flexion to a higher incidence of lower back pain and musculoskeletal injuries in high-demand work environments (Da Costa & Ramos Vieira, 2010). In the evaluated process, the cleaning, rinsing, and transport stations require frequent handling of 20 kg water containers, thereby increasing exposure to biomechanical risk factors associated with musculoskeletal disorders (Graziosi et al., 2024).

The comparative application of RULA and ERIN demonstrates a strong consensus in identifying critical workstations, particularly stations 1, 2, and 5. This finding corroborates previous studies regarding the reliability of observational postural assessment tools. Kee (2022) noted that despite structural differences, these methods often converge in identifying tasks characterized by high physical workloads, particularly when upper-limb exposure is a factor. These results provide empirical evidence to support the combined use of observational ergonomic methods in production systems with limited automation.

Discrepancies emerged, particularly at the filling station, where ERIN classified the risk as low while RULA categorized it as moderate. This difference can be attributed to the distinct methodological approaches of each tool. RULA assesses the most demanding posture within the work cycle, while ERIN incorporates cumulative factors such as movement frequency, effort intensity, and work pace.

Numerous studies have indicated that observational methods often differ in their weighting of postural variables, applied force, and repetition, resulting in variations in risk

classification for identical tasks (Grooten & Johansson, 2018; Yazdanirad et al., 2018). These findings underscore the importance of employing multiple assessment tools to achieve a more comprehensive evaluation of biomechanical exposure. Moreover, recent studies have emphasized the advantages of integrating multiple ergonomic approaches to improve the identification of musculoskeletal risk factors in tasks with a high physical workload (Jacquier-Bret & Gorce, 2024).

The Nordic Musculoskeletal Questionnaire facilitates a direct comparison between observational assessments and worker-reported symptoms. The anatomic regions exhibiting the highest prevalence of discomfort—namely the wrist, forearm, shoulder, and lower back—corresponded to workstations classified as high risk. This alignment underscores the validity of the ergonomic assessment and corresponds with studies that integrate postural and epidemiological approaches (Crawford, 2007; Koskas & Vignais, 2024).

From an intervention standpoint, recent evidence supports the anticipated reduction in risk following the implementation of operational improvements and mechanical aids. Rivilis et al. (2008) demonstrated that ergonomic interventions can significantly reduce musculoskeletal disorders when modifications are applied to work design. Similarly, recent systematic reviews indicate that interventions aimed at task redesign and work organization can effectively reduce the prevalence of these disorders (Santos et al., 2025).

Overall, these findings confirm that the combined application of RULA, ERIN, and the Nordic Musculoskeletal Questionnaire enables a more precise identification of critical ergonomic risk factors in labor-intensive processes. This methodological triangulation enhances decision-making regarding workstation redesign and plays a key role in the prevention of musculoskeletal disorders. Workstation redesign also helps to improve working conditions in environments characterized by low automation.

This study addresses the gap between observational and epidemiological ergonomic assessments in small-scale production systems, a domain that remains underrepresented in the current scientific literature.

## CONCLUSIONS

The comparative assessment using the RULA and ERIN methods revealed distinct differences in ergonomic risk levels across the five workstations involved in the artisanal water bottling process. The cleaning, rinsing, and transport stations exhibited the highest exposure levels, classified as high or very high risk, which confirms the presence of biomechanical conditions that may contribute to the development of musculoskeletal disorders among workers.

The agreement between the two methods enhances the validity of the ergonomic diagnosis. However, the disparities identified at the filling station underscore the unique

sensitivities of the RULA and ERIN methods. While RULA tends to react more critically to extreme postures at specific moments in the work cycle, ERIN incorporates cumulative variables related to work pace and perceived exertion. This methodological complementarity facilitates a more comprehensive analysis of ergonomic risk exposure.

Furthermore, the integration of the Nordic Musculoskeletal Questionnaire corroborated the correlation between observed postural exposure and the musculoskeletal symptoms reported by workers, reinforcing the consistency of the findings obtained through ergonomic evaluation methods.

The projected improvements suggest that relatively low-cost operational interventions—such as the introduction of mechanical aids for container transport, adjustments in workstation design, and the partial automation of specific operations—can significantly reduce overall ergonomic risk levels in the most critical workstations.

Ultimately, the combined use of RULA, ERIN, and the Nordic Musculoskeletal Questionnaire constitutes a viable and replicable methodology for ergonomic assessment in micro and small enterprises characterized by labor-intensive processes. In this context, ergonomics should be regarded not only as a strategy for preventing occupational risks but also as a tool for enhancing operational efficiency and promoting the sustainability of production systems. This study contributes empirical evidence from a sector that remains underrepresented in the scientific literature: small-scale water purification plants operating with manual production processes. The findings may serve as a foundation for future longitudinal research to evaluate the long-term impact of ergonomic interventions in similar production environments.

From a methodological standpoint, the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) exhibited heightened sensitivity to instantaneous postural overload, particularly in tasks that require extreme upper-limb positions. In contrast, the Ergonomic Risk Identification Network (ERIN) provides a more comprehensive evaluation by incorporating cumulative factors, including work pace, effort intensity, and worker perception. While RULA is advantageous for rapid postural screening, ERIN facilitates a more extensive assessment of overall ergonomic exposure. Therefore, the combined application of both methods is recommended to achieve a more complete ergonomic diagnosis.

Despite the contributions of this research, several methodological limitations should be recognized. First, the cross-sectional design limited the ability to evaluate ergonomic conditions over time, constraining the capacity to establish causal relationships between exposure to risk factors and the development of musculoskeletal disorders.

Second, conducting the study in a single water purification plant with specific production characteristics may restrict the generalizability of the results. The same results may not apply to other industrial contexts with different levels of automation or operational configurations.

Furthermore, while the combination of RULA, ERIN, and the Nordic Musculoskeletal Questionnaire offers a comprehensive assessment of ergonomic risk, observational methods can introduce variability in posture interpretation. Nevertheless, employing multiple complementary instruments enhances the consistency of the ergonomic diagnosis.

Finally, the Nordic Questionnaire depends on workers to report their own musculoskeletal symptoms. These reports can be affected by personal factors and how individuals perceive pain. However, when combined with methods that assess posture, these self-reports provide a way to compare epidemiological data with the actual biomechanical exposure that occurs in the workplace.

Future research could broaden the analysis through longitudinal studies that evaluate the progression of musculoskeletal disorders over time and assess the effectiveness of specific ergonomic interventions in production systems characterized by intensive manual material handling.

The results of this study hold significant implications for ergonomic management in micro and small enterprises characterized by labor-intensive processes. The identification of critical workstations through the combined application of the RULA and ERIN methods enabled the establishment of intervention priorities to reduce exposure to biomechanical risk factors.

In this light, ergonomics can serve as a strategic tool not only for preventing musculoskeletal disorders but also for enhancing productivity and promoting operational sustainability in production systems with low levels of automation.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors affirm they have no conflicts of interest related to the conduct or publication of this study.

## AUTHOR CONTRIBUTION

**Reina Verónica Román Salinas:** conceptualization, formal analysis, research, methodology, project administration, resources, validation, visualization, writing—original draft, writing—review and editing. **Marco Antonio Díaz Martínez:** conceptualization, formal analysis, research, project administration, resources, supervision, validation, visualization, writing—original draft, writing—review and editing. **Víctor Hugo Tobías Martínez:** research, methodology, project administration, supervision, visualization, writing—original draft, writing—review and editing. **Edgar Jearvavi Vázquez Moreno:** formal analysis, methodology, resources, supervision, validation, visualization, writing—original draft, writing—review and editing. **Rubén Jérez Calderón:** research, resources, validation, visualization, writing—original draft, writing—review and editing.

## DECLARATION ON THE USE OF GENERATIVE IA

The authors used generative AI tools solely to improve the writing, grammar, and clarity of the manuscript. The interpretation of the results, analysis, and conclusions correspond exclusively to the authors.

## REFERENCES

- Ansari, N. A., & Sheikh, M. J. (2014). Evaluation of work posture by RULA and REBA: A case study. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11(4), 18-23. <https://doi.org/10.9790/1684-11431823>
- Baklouti, S., Chaker, A., Rezgui, T., Sahbani, A., Bennour, S., & Laribi, M. A. (2024). A novel IMU-based system for work-related musculoskeletal disorders risk assessment. *Sensors*, 24(11), Article 3419. <https://doi.org/10.3390/s24113419>
- Conforti, I., Mileti, I., Del Prete, Z., & Palermo, E. (2019, 4-6 June). *Assessing ergonomics and biomechanical risk in manual handling of loads through a wearable system* [Paper presentation]. 2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT), Naples, Italy. <https://doi.org/10.1109/METROI4.2019.8792843>
- Crawford, J. O. (2007). The nordic musculoskeletal questionnaire. *Occupational Medicine*, 57(4), 300-301. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqm036>
- Da Costa, B. R., & Ramos Vieira, E. (2010). Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: A systematic review of recent longitudinal studies. *American Journal of Industrial Medicine*, 53(3), 285-323. <https://doi.org/10.1002/ajim.20750>
- Demissie, B., Bayih, E. T., & Demmelash, A. A. (2024). A systematic review of work-related musculoskeletal disorders and risk factors among computer users. *Heliyon*, 10(3), Article e25075. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25075>
- Graziosi, F., Bonfiglioli, R., Decataldo, F., & Violante, F. S. (2024). Criteria for assessing exposure to biomechanical risk factors: A research-to-practice guide-part 1: General issues and manual material handling. *Life*, 14(11), Article 1398. <https://doi.org/10.3390/life14111398>
- Grooten, W. J. A., & Johansson, E. (2018). Observational methods for assessing ergonomic risks for work-related musculoskeletal disorders: A scoping review. *Revista Ciencias de la Salud*, 16(special), 8-38. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/revsalud/a.6840>
- Jacquier-Bret, J., & Gorce, P. (2024). Work-related musculoskeletal disorders risk assessment during manual lymphatic drainage with compression bands

- among physiotherapists. *Healthcare*, 12(1), Article 118. <https://doi.org/10.3390/healthcare12010118>
- Kee, D. (2022). Systematic comparison of OWAS, RULA and REBA based on a literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(1), Article 595. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010595>
- Koskas, D., & Vignais, N. (2024). Physical ergonomic assessment in cleaning hospital perating rooms based on inertial measurement units. *Bioengineering*, 11(2), Article 54. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11020154>
- Kuorinka, I., Jonsson, B., Kilbom, Å., Vinterberg, H., Biering-Sørensen, F., Andersson, G., & Jørgensen, K. (1987). Standardised nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms. *Applied Ergonomics*, 18(3), 233-237. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(87\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0003-6870(87)90010-X)
- McAtamney, L., & Corlett, E. N. (1993). RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24(2), 91-99. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S)
- Muhacir, D., Aktaş, M. i., & Özceylan, E. (2022). REBA and RULA ergonomic risk assessments of operators in a maintenance and repair workshop of a textile factory. *Acta Technica Napocensis*, 65(3S), 759-768. <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/1960/1559>
- Oakman, J., Neupane, S., Proper, K., Kinsman, N., & Nygård, C-H. (2017). Workplace interventions to improve work ability: A systematic review and meta-analysis of their effectiveness. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 44(2), 134-146. <https://doi.org/10.5271/sjweh.3685>
- Rivilis, I., Van Eerd, D., Cullen, K., Cole, D. C., Irvin, E., Tyson, J., & Mahood, Q. (2008). Effectiveness of participatory ergonomic interventions on health outcomes: A systematic review. *Applied Ergonomics*, 39(3), 342-358. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2007.08.006>
- Santos, W., Rojas, C., Isidoro, R., Lorente, A., Dias, A., Mariscal, G., Benlloch, M., & Lorente, R. (2025). Efficacy of ergonomic interventions on work-related musculoskeletal pain: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Medicine*, 14(9), Article 3034. <https://doi.org/10.3390/jcm14093034>
- Soares, D., Bernardes, L., & Nicodemo, D. (2026). Ergonomics in manual lifting and load handling: A literature review on biomechanical risks and technologies for the prevention of musculoskeletal disorders. *Research, Society and Development*, 15(1), Article e6615150485. <https://doi.org/10.33448/rsd-v15i1.50485>

- Takala, E. P., Pehkonen, I., Forsman, M., Hansson, G. Å., Mathiassen, S. E., Neumann, W. P., Sjøgaard, G., Veiersted, K. B., Westgaard, R. H., & Winkel, J. (2010). Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 36(1), 3-24. <https://doi.org/10.5271/sjweh.2876>
- Yang, F., Di, N., Guo, W-w., Ding, W-b., Jia, N., Zhang, D., Li, D., Wang, D., Wang, R., Zhang, Liu, Y., Shen, B., Wang, Z-x., & Yin, Y. (2023). The prevalence and risk factors of work-related musculoskeletal disorders among electronics manufacturing workers: A cross-sectional analytical study in China. *BMC Public Health*, 23(10), Article 10. <https://doi.org/10.1186/s12889-022-14952-6>
- Yazdanirad, S., Khoshakhlagh, A. H., Habibi, E., Zare, A., Zeinodini, M., & Dehghani, F. (2018). Comparing the effectiveness of three ergonomic risk assessment methods –RULA, LUBA, and NERPA– to predict the upper extremity musculoskeletal disorders. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 22(1), 17-21. [https://journals.lww.com/ijoe/fulltext/2018/22010/comparing\\_the\\_effectiveness\\_of\\_three\\_ergonomic.5.aspx](https://journals.lww.com/ijoe/fulltext/2018/22010/comparing_the_effectiveness_of_three_ergonomic.5.aspx)

# EFFECTO DEL MANTENIMIENTO AUTÓNOMO Y LA ELIMINACIÓN DE PÉRDIDAS EN LA SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA: UN MODELO SEM

JOSÉ DARÍO VÁSQUEZ MARTÍNEZ\*

<https://orcid.org/0009-0001-4851-3353>

Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura,  
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,  
Instituto de Ingeniería y Tecnología, México

JORGE LUIS GARCÍA ALCARAZ

<https://orcid.org/0000-0002-7092-6963>

Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura,  
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,  
Instituto de Ingeniería y Tecnología, México

JOSÉ LUIS PEINADO PORTILLO

<https://orcid.org/0000-0002-2162-8118>

Departamento de Mecatrónica,  
Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez, México

Recibido: 26 de febrero del 2026 / Aceptado: 12 de abril del 2026

Publicado: 15 de junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8627>

**RESUMEN.** Este estudio analiza cómo el mantenimiento autónomo (IAMA) fortalece la sostenibilidad económica (ECSU) en empresas manufactureras, considerando la eliminación de pérdidas (FELO) como eje del mantenimiento productivo total (TPM). El mantenimiento autónomo implica que los operarios participen en el cuidado básico de sus equipos para reducir fallas y tiempos muertos. Mediante un modelo de mínimos cuadrados parciales y ecuaciones estructurales (PLS-SEM) aplicado a 243 profesionales en Ciudad Juárez, México, se encontró que el IAMA reduce las pérdidas ( $\beta = 0,738$ ,  $p < 0,01$ ), lo que mejora la ECSU

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: [al250981@alumnos.uacj.mx](mailto:al250981@alumnos.uacj.mx); [jorge.garcia2@uacj.mx](mailto:jorge.garcia2@uacj.mx); [jose\\_peinado@utcj.edu.mx](mailto:jose_peinado@utcj.edu.mx)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

( $\beta = 0,476, p < 0,01$ ). Asimismo, presenta un efecto directo menor sobre ECSU ( $\beta = 0,179, p < 0,01$ ) y un efecto indirecto relevante ( $\beta = 0,351$ ). El modelo explica el 54 % de FELO y el 38 % de ECSU, lo que evidencia una capacidad explicativa adecuada y un ajuste global satisfactorio mediante el cual genera beneficios económicos.

PALABRAS CLAVE: mantenimiento autónomo / eliminación de pérdidas / sostenibilidad económica / TPM / industria manufacturera

## EFFECT OF AUTONOMOUS MAINTENANCE AND LOSS ELIMINATION ON ECONOMIC SUSTAINABILITY: A SEM MODEL

ABSTRACT. This study analyzes how Autonomous Maintenance (IAMA) strengthens Economic Sustainability (ECSU) in manufacturing companies, considering Loss Elimination (FELO) as a key mechanism within the Total Productive Maintenance (TPM) framework. In practical terms, autonomous maintenance involves the active participation of operators in the basic care of their equipment, which helps reduce failures and downtime. Using a PLS-SEM model applied to 243 professionals in Ciudad Juárez, Mexico, the results show that IAMA reduces losses ( $\beta = 0,738, p < 0,01$ ), which in turn improves ECSU ( $\beta = 0,476, p < 0,01$ ). Additionally, IAMA presents a smaller direct effect on ECSU ( $\beta = 0,179, p < 0,01$ ) and a relevant indirect effect ( $\beta = 0,351$ ). The model explains 54 % of FELO and 38 % of ECSU, highlighting loss reduction as the main mechanism through which autonomous maintenance generates economic benefits.

KEYWORDS: autonomous maintenance / loss elimination / economic sustainability / TPM / manufacturing industry

## INTRODUCCIÓN

En el mundo industrial actual, las empresas de manufactura tienen el reto permanente de aumentar su eficiencia, reducir costos y ser competitivas a largo plazo, especialmente en materia de sostenibilidad económica (Ahuja & Khamba, 2008; García-Alcaraz et al., 2022). En este escenario, la continuidad operativa y el desempeño de los equipos se convierten en elementos críticos dentro de la gestión diaria de las organizaciones, lo que ha llevado a adoptar estrategias de mantenimiento con un enfoque cada vez más práctico y orientado a resultados. Estas demandas no solo buscan aumentar la productividad, sino que también se relacionan con la necesidad de garantizar la estabilidad de los procesos, la continuidad de las operaciones y la supervisión financiera en entornos productivos cada vez más complejos. En este contexto, manejar adecuadamente los recursos y reducir las pérdidas resultan muy importantes en la gestión industrial.

El mantenimiento productivo total (TPM) busca incrementar el rendimiento operativo, pero también disminuir las pérdidas por el mal estado de los equipos o incompetencias del personal involucrado (Ahuja & Khamba, 2008). En la práctica, este enfoque implica la participación directa de los operarios en actividades de mantenimiento y en la detección oportuna de fallas, lo que contribuye a mejorar la eficiencia de los procesos. El TPM surgió en Japón con un enfoque netamente técnico; sin embargo, ha evolucionado para transformarse en uno que ya integra aspectos sociales. Es decir, se busca lograr una adecuada interacción entre los factores humanos y los tecnológicos, lo cual permite obtener mayor rendimiento financiero (Nakajima, 1988; Singh & Awoke, 2023). Así pues, el TPM ha logrado una nueva visión del mantenimiento tradicional conectando de manera armoniosa la función operativa, los recursos humanos y los resultados esperados de la empresa.

El TPM se estructura en torno a múltiples pilares interrelacionados, entre los que se incluyen la clasificación, el orden, la limpieza, la estandarización y la disciplina (5S), los cuales constituyen la base operativa sobre la que se sostienen al establecer condiciones de orden, disciplina y mejora continua del mantenimiento planificado y la mejora enfocada (Nakajima, 1988). El presente estudio se centra de manera específica en la implementación del mantenimiento autónomo (IAMA) y su relación con la eliminación de pérdidas (FELO) y la sostenibilidad económica (ECSU). Adopta un enfoque parsimonioso que permite aislar estos mecanismos específicos dentro de un sistema más amplio sustentado en dicha base organizacional.

El TPM se basa en una filosofía integral que incorpora prácticas de mejora continua, como el Kaizen, que facilitan la estandarización de procesos, la identificación sistemática de desperdicios y la participación activa del personal operativo (Ahuja & Khamba, 2008; Nakajima, 1988). En este sentido, uno de los pilares fundamentales del TPM, la IAMA, únicamente es factible de implementar si existe una cultura organizacional orientada a

la mejora continua, donde los operarios adquieran habilidades para detectar anomalías, prevenir fallas y proponer mejoras en el uso de los equipos (Al-refaie et al., 2022).

Es importante señalar que, aunque el TPM se sustenta en prácticas como el Kaizen y herramientas como las 5S, estos elementos no forman parte del modelo estructural analizado en este estudio. Su inclusión en esta sección responde a la necesidad de contextualizar el entorno organizacional en el que se desarrolla el mantenimiento autónomo; sin embargo, el análisis empírico se centra exclusivamente en la relación entre la IAMA, la FELO y la ECSU. Esta delimitación permite mantener claridad en la interpretación de los resultados y evita atribuir efectos a variables que no fueron modeladas directamente.

Como se mencionó, uno de los pilares más importantes del TPM es la IAMA, el cual se enfoca en inculcar en los operadores de máquinas el desarrollo de tareas de mantenimiento básico: limpiarlas, inspeccionarlas y lubricarlas cuando se requiera. Estos simples hábitos crean mayor conciencia en el operador, en cómo se opera cada una de las máquinas y equipos. Ello permite identificar fallas tempranas y falta de calibración, lo que reduce la cantidad de defectos e incrementa su disponibilidad y la productividad del sistema (Bataineh et al., 2019; Chundhoo et al., 2025; Singh & Awoke, 2023).

Por su parte, la FELO es considerada la piedra angular del TPM, ya que permite identificar y mitigar grandes pérdidas de los sistemas productivos, tales como fallos, tiempos de ajuste, microparos, retrasos en la velocidad, fallos de calidad y merma de la eficiencia operativa (Braglia et al., 2008). La FELO bien ejecutada fomenta una cultura de mejoramiento continuo y disminuye desperdicios del proceso productivo. Además, en estudios previos, se ha relacionado con incrementos en la eficiencia global de los equipos (OEE), lo que facilita la estabilización de los procesos (Escobal et al., 2025).

La IAMA y la FELO deben ofrecer algún beneficio a las empresas para poder justificar inversiones en ellas, tales como la ECSU, la cual se define como la capacidad organizacional para mantener estándares competitivos, optimizar los recursos, minimizar los desechos o desperdicios y, así, incrementar el rendimiento financiero (Badghish & Soomro, 2024; Barney, 1991). De acuerdo con la teoría de recursos y capacidades, la autonomía operativa y la disciplina organizacional generan ventajas competitivas cuando se materializan (Barney, 1991).

Estudios previos demuestran que el involucramiento del personal en las prácticas de mantenimiento impacta directamente en la reducción de pérdidas y rentabilidad económica (Morales Méndez & Rodríguez, 2017; Santos et al., 2012). No obstante, persisten vacíos en la literatura que limitan la comprensión de estos mecanismos. Desde el punto de vista empírico, son escasos los estudios que han cuantificado el papel mediador que la FELO podría desempeñar entre el IAMA y la ECSU. Desde el punto de vista metodológico, la mayoría de los trabajos previos han analizado estas relaciones de forma bivariada o descriptiva sin emplear modelos que estimen simultáneamente efectos directos e indirectos

entre variables latentes (García-Alcaraz et al., 2022). Finalmente, desde una perspectiva contextual, la evidencia sobre el TPM en el sector manufacturero de Ciudad Juárez —región con alta concentración de industria maquiladora, rotación de personal y presión competitiva— resulta limitada pese a tratarse de un entorno particularmente relevante para estudiar la relación entre prácticas de mantenimiento y desempeño económico. Ante estas brechas, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cuál es el efecto de la implementación del mantenimiento autónomo en la eliminación de pérdidas al implementar el mantenimiento productivo total?
2. ¿Cuál es el efecto de la implementación del mantenimiento autónomo en la sostenibilidad económica al implementar el mantenimiento productivo total?
3. ¿Cuál es el efecto de la eliminación de pérdidas en la sostenibilidad económica al implementar el mantenimiento productivo total?

Si bien la dirección general de estas relaciones parece intuitiva desde la experiencia profesional en mantenimiento, la literatura carece de estimaciones que cuantifiquen la magnitud de dichos efectos, que identifiquen el peso relativo de los mecanismos directos frente a los indirectos o que evalúen posibles comportamientos no lineales en función del nivel de implementación. El modelado de ecuaciones estructurales (SEM) permite abordar estas cuestiones de forma simultánea superando las limitaciones de los análisis bivariados o descriptivos que predominan en la literatura sobre TPM (García-Alcaraz et al., 2022; Hair et al., 2016).

El modelo estructural planteado articula tres dimensiones centrales del TPM: la IAMA, la FELO y la ECSU. En ese sentido, se examinan tanto los efectos directos como los mecanismos indirectos mediante los cuales el IAMA podría incidir en la ECSU, considerando a la FELO como posible variable mediadora dentro de la dinámica operativa y financiera del sistema productivo. Desde una perspectiva operativa, cuando las rutinas de IAMA se internalizan de manera consistente por el personal operativo, tienden a generar mayores niveles de estabilidad operativa y una reducción gradual de microparos y defectos acumulativos (Al-refaie et al., 2022; Singh & Gurtu, 2022).

En este sentido, el IAMA podría trascender su carácter técnico y constituirse en un mecanismo organizacional que facilite la estructuración progresiva de esfuerzos orientados a la FELO, lo que permite proponer la hipótesis siguiente:

**H1.** La implementación del mantenimiento autónomo tiene un efecto directo y positivo sobre el enfoque de eliminación de pérdidas.

En el ámbito económico, se ha planteado que los efectos derivados del IAMA pueden extenderse más allá del desempeño estrictamente operativo. La disminución de fallos imprevistos y la mejora en la disponibilidad de los equipos suelen relacionarse con mayores

niveles de eficiencia y con un control más estable de costos; particularmente, en contextos manufactureros caracterizados por alta presión competitiva (Samadhiya & Agrawal, 2024; Shannon et al., 2023). Sin embargo, la traducción de dichas mejoras en resultados económicos sostenibles no necesariamente ocurre de forma inmediata ni homogénea entre organizaciones, ya que puede depender del grado de madurez en la implementación del TPM y de factores estructurales propios del entorno productivo. Por ello, se debe evaluar empíricamente si la IAMA mantiene una relación directa con la ECSU. Al respecto, se propone la hipótesis siguiente:

**H2.** La implementación del mantenimiento autónomo tiene un efecto directo y positivo sobre la sostenibilidad económica.

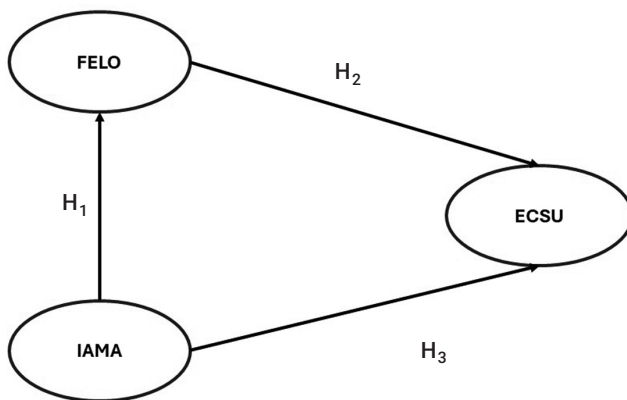
El enfoque en la eliminación de pérdidas constituye uno de los pilares operativos del TPM y ha sido señalado como mecanismo relevante para la generación de mejoras económicas sostenidas en el tiempo. La reducción sistemática de desperdicios, tiempos muertos y reprocesos tiende a producir efectos acumulativos sobre la eficiencia productiva y sobre el control presupuestal (Au-Yong et al., 2022; Samadhiya et al., 2023). Aun así, la magnitud de estos beneficios puede variar en función del nivel de integración entre las prácticas técnicas y la cultura organizacional existente. En consecuencia, resulta necesario analizar de manera directa el efecto del enfoque de eliminación de pérdidas sobre la sostenibilidad económica. Al respecto, se propone la hipótesis siguiente:

**H3.** El enfoque en la eliminación de pérdidas tiene un efecto directo y positivo sobre la sostenibilidad económica.

La Figura 1 ilustra las hipótesis propuestas.

**Figura 1**

*Hipótesis de investigación propuestas*



Este artículo se estructura en cinco secciones. Luego de la sección introductoria, en la sección de metodología, se describe cómo está diseñada la investigación, qué herramienta se emplea para la recolección de datos y bajo qué enfoque estadístico se analiza el modelo propuesto. Más adelante, en la sección de resultados, se presentan los hallazgos más relevantes del modelo estructural. En la sección de discusión, se interpretan los resultados tomando como referencia la literatura previa y, finalmente, en la sección de conclusiones, se sintetizan las contribuciones del estudio y sus implicaciones tanto prácticas como teóricas.

## METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de alcance explicativo y diseño transversal. Se eligió la técnica de mínimos cuadrados parciales y ecuaciones estructurales (PLS-SEM), implementada en el software WarpPLS 8.0 (Kock, 2023), por tres razones. La primera fue porque permite estimar simultáneamente múltiples relaciones causales entre variables latentes, lo que resulta necesario para evaluar si FELO actúa como variable mediadora entre IAMA y ECSU. La segunda, porque el enfoque PLS es adecuado para modelos con orientación predictiva y tamaños de muestra moderados (Hair et al., 2016). La tercera, debido a que WarpPLS permite analizar relaciones no lineales mediante funciones *warped*, lo que posibilita identificar rendimientos marginales decrecientes que no serían detectables mediante regresión convencional (Kock, 2023). La delimitación del modelo a tres constructos responde a criterios de parsimonia y viabilidad estadística, ya que incluir simultáneamente todos los pilares del TPM comprometería la estabilidad de las estimaciones (Hair et al., 2016).

La recolección se llevó a cabo entre marzo y abril de 2025; la población objetivo estuvo conformada por profesionales del sector manufacturero con experiencia en procesos de mantenimiento y operación de equipos. Así, la unidad de análisis corresponde a trabajadores que desempeñan funciones de gestión, supervisión u operación del mantenimiento. La muestra final estuvo integrada por 243 participantes seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia que consideró la accesibilidad a las empresas y la disponibilidad de los encuestados.

El instrumento de recolección de datos fue un cuestionario estructurado elaborado a partir de la literatura sobre los factores críticos del TPM y su relación con la sostenibilidad (Braglia et al., 2008; García-Alcaraz et al., 2022), el cual se adjunta como documento complementario para efectos de validación del instrumento. El contenido fue validado por un grupo de expertos académicos e industriales, quienes evaluaron la claridad y la coherencia de los ítems. La aplicación del cuestionario se realizó de forma electrónica, garantizando la confidencialidad y el consentimiento informado de los participantes, los cuales debían estar vinculados profesionalmente a empresas manufactureras con prácticas documentadas de TPM y desempeñar funciones de gestión, supervisión u operación del

mantenimiento. Estos criterios se verificaron mediante preguntas de filtro al inicio del cuestionario.

Los ítems se midieron mediante una escala tipo Likert de cinco puntos. El uso de escalas perceptuales tipo Likert es una práctica consolidada en la investigación sobre TPM cuando se trabaja con variables latentes que, por su naturaleza multidimensional, no pueden medirse directamente mediante un único indicador objetivo (Hair et al., 2016; García-Alcaraz et al., 2022; Samadhiya & Agrawal, 2024).

El instrumento final estuvo conformado por ítems agrupados en tres constructos latentes: la IAMA, la FELO y la ECSU. En total, se consideraron 13 ítems en el modelo estructural final (3 para IAMA, 5 para FELO y 5 para ECSU). Los ítems fueron seleccionados a partir de un instrumento más amplio previamente validado en estudios de TPM y se incluyen como material complementario para garantizar la transparencia del modelo de medición. Ningún ítem fue eliminado durante el proceso de estimación, ya que todos cumplieron con los criterios de validez y fiabilidad establecidos en la literatura (Hair et al., 2016). La fiabilidad y validez de este enfoque se verifica en la sección de resultados. En particular, la validez de constructo se evaluó mediante el modelo de medición siguiendo los criterios establecidos en la literatura (Hair et al., 2016).

Los datos se depuraron para eliminar respuestas inconsistentes y valores atípicos. Posteriormente, se realizó un análisis descriptivo inicial y la validación del modelo de medición evaluando la fiabilidad interna mediante los coeficientes de Cronbach ( $\alpha$ ) y fiabilidad compuesta (CR), la validez convergente a través de la varianza media extraída (AVE) y la validez discriminante utilizando el criterio de Fornell-Larcker.

El modelo estructural se evaluó mediante indicadores de ajuste global que incluyeron el Average Path Coefficient (APC), el Average  $R^2$  (ARS), el Average Variance Inflation Factor (AVIF) y el Goodness of Fit (GoF). Se consideraron como criterios de aceptación valores significativos para el APC ( $p < 0.05$ ), valores elevados de ARS, valores de AVIF inferiores a 3.3 y valores GoF superiores a 0.36, según los criterios establecidos por Hair et al. (2016) y Kock (2023). La significancia estadística de los parámetros se determinó mediante remuestreo (*bootstrapping*) para estimar la estabilidad de los efectos directos e indirectos. Más adelante, en la Figura 2, se representa el modelo simplificado en el que la IAMA actúa como variable exógena, el FELO como variable mediadora y la ECSU como variable endógena.

Además del análisis estructural lineal tradicional, se analizaron posibles efectos no lineales entre las variables latentes a través de funciones warped integradas en WarpPLS 8.0. Este enfoque permite modelar relaciones curvilíneas sin asumir una forma funcional específica a partir de las puntuaciones estandarizadas de las variables latentes (Kock, 2023). Las gráficas reportadas en la sección de resultados corresponden a las curvas de

mejor ajuste generadas por el *software*, las cuales muestran la variación en la intensidad del efecto a lo largo de distintos niveles de implementación de las prácticas analizadas.

De forma complementaria, se realizó un análisis de sensibilidad probabilístico con el propósito de evaluar la estabilidad de las relaciones estructurales bajo distintos escenarios de implementación. Para ello, se utilizaron las herramientas de simulación incluidas en WarpPLS que estiman probabilidades condicionales de ocurrencia de valores altos y bajos en las variables endógenas a partir de los coeficientes estructurales obtenidos y la distribución observada de los datos (Kock, 2023). Este procedimiento permitió analizar en términos perceptuales, y con base en las respuestas obtenidas, cómo varía el comportamiento del modelo ante cambios en los niveles de las variables exógenas y mediadoras.

En la siguiente sección, se presentan los resultados empíricos derivados de la estimación del modelo estructural.

## RESULTADOS

### Caracterización de la muestra

El cuestionario se aplicó a 243 profesionales del sector manufacturero de Ciudad Juárez, México, principalmente ingenieros (62,1 %), supervisores (35 %) y gerentes (2,9 %). En cuanto a la experiencia laboral, el 47 % indicó contar con entre 2 y 5 años de experiencia en actividades de mantenimiento, lo que refleja un perfil técnico-operativo con dominio práctico de los procesos.

La mayoría de los participantes pertenece a los sectores automotriz (25,5 %) y electrónico (20,1 %), seguidos del metalmecánico (20 %), médico (18 %) y plástico (10 %). Además, el 69,5 % labora en empresas grandes con más de 250 empleados, donde las prácticas de TPM están consolidadas. La predominancia de empresas grandes es coherente con el objeto de estudio, dado que la implementación estructurada del TPM requiere infraestructura, recursos y niveles de estandarización más frecuentes en entornos de gran escala (Ahuja & Khamba, 2008). El perfil de los encuestados —ingenieros y supervisores— respalda la pertinencia de las respuestas.

### Fiabilidad y validez del modelo de medida

Los resultados del modelo de medición evidencian niveles adecuados de fiabilidad interna y de validez convergente (ver Tabla 1). Los coeficientes de  $\alpha$  de Cronbach (0,785-0,890) y la fiabilidad compuesta (0,875-0,919) superan el umbral recomendado de 0,70 para la fiabilidad interna. Asimismo, las varianzas medias extraídas (AVE = 0,669-0,701) confirman una convergencia sólida entre los ítems de cada constructo. Los valores del factor de inflación de la varianza (VIF < 2,6) descartan problemas de colinealidad, mientras que el criterio de

Fornell-Larcker valida la discriminación entre constructos. Además, las cargas factoriales de los ítems fueron superiores a 0,70 y estadísticamente significativas ( $p < 0,001$ ), lo que confirma la validez de constructo del modelo de medición (Hair et al., 2016).

**Tabla 1**

*Validación de índices de las variables latentes*

Variable	Cronbach's $\alpha$	CR	AVE	VIF
IAMA	0,785	0,875	0,701	2,215
FELO	0,876	0,910	0,669	2,540
ECSU	0,890	0,919	0,695	1,594

*Nota.* Cronbach's  $\alpha$  = alfa de Cronbach; CR = fiabilidad compuesta; AVE = varianza extraída promedio; VIF = factor de inflación de la varianza.

### Resultados del modelo estructural

El modelo estructural simplificado se presenta en la Figura 2, donde se observan tres relaciones directas y significativas entre las variables analizadas. La IAMA ejerce un efecto positivo sobre el FELO con  $\beta = 0,738$  ( $p < 0,01$ ), mientras que FELO influye directamente sobre la ECSU con  $\beta = 0,476$  ( $p < 0,01$ ). Por su parte, IAMA muestra un efecto directo menor, aunque significativo, sobre ECSU ( $\beta = 0,179$ ,  $p < 0,01$ ).

Desde la perspectiva de la magnitud de los coeficientes estandarizados, el efecto de IAMA sobre FELO puede interpretarse como fuerte dentro del modelo, mientras que el efecto de FELO sobre ECSU resulta moderado y el efecto directo de IAMA sobre ECSU es más reducido, aunque estadísticamente significativo (Hair et al., 2016).

En conjunto, los resultados respaldan las tres hipótesis propuestas (H1-H3) y validan la coherencia interna del modelo evidenciando un poder explicativo moderado ( $R^2 = 0,54$  para FELO y  $R^2 = 0,38$  para ECSU). Estos resultados indican una relación positiva entre el IAMA, el FELO y la ECSU (ver Tabla 2). De acuerdo con los criterios empleados en PLS-SEM, estos valores pueden interpretarse como una capacidad explicativa moderada para FELO y débil a moderada para ECSU, lo que indica que el modelo explica una proporción relevante de la variabilidad de ambas variables endógenas (Hair et al., 2016).

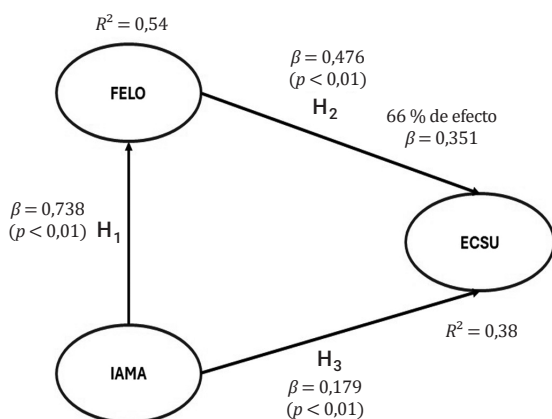
Desde la percepción de los trabajadores, las empresas manufactureras que fortalecen el mantenimiento autónomo tienden a reducir de manera significativa las pérdidas operativas, lo que, posteriormente, se traduce en mejoras en la sostenibilidad económica. Según las respuestas obtenidas, cuando las organizaciones promueven la participación activa de los operarios en la limpieza, inspección y ajuste básico de los equipos, es más probable detectar fallas antes de que generen paros no planificados o defectos en la producción. Esta reducción en interrupciones y desperdicios, desde una perspectiva perceptual, impacta directamente en la eficiencia del proceso y en la disminución de costos operativos.

## Índices de ajuste global y efectos indirectos

El ajuste del modelo en la Figura 2 fue satisfactorio con valores consistentes con los umbrales recomendados en la literatura para modelos PLS-SEM y WarpPLS. En particular, se obtuvo un APC = 0,465 ( $p < 0,001$ ), ARS = 0,464 ( $p < 0,001$ ), AVIF = 2,142 ( $< 3,3$ ) y GoF = 0,565. Estos resultados se encuentran dentro de los criterios establecidos y respaldan la adecuación global del modelo estructural propuesto descartando problemas relevantes de colinealidad (Hair et al., 2016; Kock, 2023).

**Figura 2**

*Modelo estructural del estudio simplificado*



**Tabla 2**

*Resultados del modelo estructural simplificado*

Relación	$\beta$	$p$	Resultado
IAMA → FELO	0,738	$p < 0,01$	Significativo
FELO → ECSU	0,476	$p < 0,01$	Significativo
IAMA → ECSU	0,179	$p < 0,01$	Significativo

*Nota.*  $R^2$  FELO = 0,54;  $R^2$  ECSU = 0,38

El análisis de efectos indica que la IAMA influye en la ECSU tanto de forma directa como indirecta a través del FELO. El efecto indirecto se obtuvo a partir del producto de los coeficientes de las rutas IAMA→FELO y FELO→ECSU; es decir,  $0,738 \times 0,476 = 0,351$ . Por su parte, el efecto total de IAMA sobre ECSU fue  $\beta = 0,530$ , resultado de sumar el efecto directo (0,179) y el efecto indirecto (0,351) (Hair et al., 2016).

A partir de estos valores, el efecto indirecto representa aproximadamente el 66,2 % del efecto total [ $(0,351 / 0,530) \times 100$ ], lo que evidencia que una parte sustancial de la

relación entre mantenimiento autónomo y sostenibilidad económica ocurre a través de la eliminación de pérdidas. En este sentido, el papel mediador del FELO resulta relevante, ya que el impacto del mantenimiento autónomo sobre el desempeño económico se explica en gran medida por su capacidad para reducir pérdidas operativas.

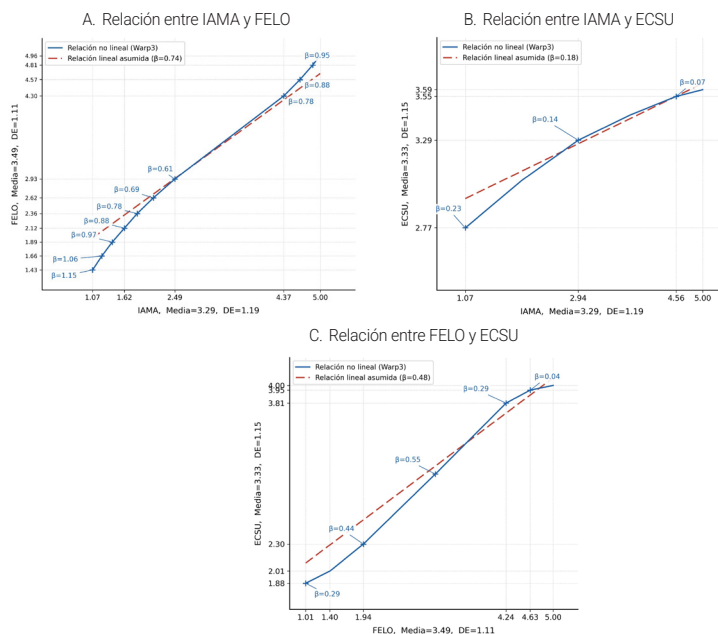
De manera complementaria al análisis lineal, se examinó el comportamiento no lineal de las relaciones estructurales mediante las funciones warped incluidas en WarpPLS 8.0. Este procedimiento permite estimar relaciones curvilíneas entre variables latentes, a partir de sus puntuaciones estandarizadas, sin imponer una forma funcional específica e identificando variaciones en la intensidad del efecto a lo largo de distintos niveles de la variable predictora (Kock, 2023).

Los resultados indican que las relaciones IAMA→FELO, IAMA→ECSU y FELO→ECSU no siguen una trayectoria estrictamente lineal, sino que presentan una mayor intensidad del efecto en los niveles de implementación bajos y medios (ver Figura 3).

El comportamiento observado en la relación IAMA→ECSU indica que el impacto del mantenimiento autónomo sobre la sostenibilidad económica en términos perceptuales no es uniforme a lo largo de los distintos niveles de implementación. Las mejoras económicas más relevantes, según las respuestas obtenidas, se concentran en las fases iniciales y de consolidación intermedia. En niveles más altos de madurez operativa, los efectos tienden a estabilizarse, lo que sugiere la presencia de rendimientos marginales decrecientes.

**Figura 3**

*Comportamiento no lineal de las relaciones estructurales estimadas mediante WarpPLS*



Asimismo, la relación entre el enfoque en la eliminación de pérdidas y la sostenibilidad económica (FELO→ECSU), desde la perspectiva de los encuestados, presenta un comportamiento no lineal con un efecto más pronunciado en los niveles de implementación bajos y medios. Conforme el enfoque se consolida y alcanza niveles más altos, el impacto adicional sobre la sostenibilidad económica tiende a moderarse.

### Análisis de sensibilidad

En la Tabla 3, se ilustra el análisis de sensibilidad basado en probabilidades, donde el signo + indica niveles altos percibidos de implementación, mientras que - indica niveles bajos. Así, por ejemplo, cuando se obtiene IAMA+, la probabilidad de percibir un FELO+ es de 0,511 y la de percibir un ECSU+ es de 0,468. En escenarios con niveles bajos percibidos de implementación de IAMA o FELO, las probabilidades de obtener ECSU son 0,703 y 0,432, respectivamente. Estos resultados, basados en las respuestas de los participantes, sugieren un mayor riesgo percibido en términos de desempeño económico, lo que puede orientar la toma de decisiones en contextos organizacionales.

**Tabla 3**

*Análisis de sensibilidad*

Variable dependiente	Condición	Valor base	IAMA (+) 0,191	IAMA (-) 0,150	FELO (+) 0,138	FELO (-) 0,862
FELO	+	0,138	& = 0,098; IF = 0,511	& = 0,000; IF = 0,000	—	—
FELO	-	0,150	& = 0,000; IF = 0,000	& = 0,106; IF = 0,703	—	—
ECSU	+	0,199	& = 0,089; IF = 0,468	& = 0,004; IF = 0,027	& = 0,077; IF = 0,559	&=0,004; IF = 0,027
ECSU	-	0,154	& = 0,012; IF = 0,064	& = 0,065; IF = 0,432	& = 0,008; IF = 0,059	& = 0,081; IF = 0,541

*Nota.* (&) coeficiente de sensibilidad; IF = índice de impacto; (+) incremento en la variable; (-) disminución de la variable. Los guiones indican combinaciones no aplicables.

## DISCUSIÓN

Los datos recopilados permiten desentrañar cómo se comportan las variables analizadas en el ámbito del TPM, especialmente, en el vínculo entre el FELO, el ECSU y el IAMA. En términos generales, los datos empíricos revelan que la adopción del mantenimiento autónomo intensifica las estrategias de gestión meticulosa de pérdidas, por lo que se eleva el rendimiento financiero de las empresas manufactureras.

Este comportamiento se ajusta a la visión sociotécnica del TPM, donde el rendimiento organizacional depende tanto de la infraestructura técnica como de la participación

sistemática del personal operativo en actividades de mejora continua. Incorporar rutinas esenciales de verificación, limpieza y control acelera la detección precoz de fallos y uniformiza las prácticas operativas, lo que crea un ambiente más seguro para el funcionamiento de los sistemas productivos. Estos hallazgos se corresponden con investigaciones anteriores que subrayan la importancia crucial de la implicación operativa en la optimización del rendimiento productivo (Chundhoo et al., 2025; Nakajima, 1988).

Cabe destacar que, si bien la existencia de una relación positiva entre el IAMA y el ECSU puede anticiparse desde la experiencia profesional, el modelo estructural aporta hallazgos que trascienden dicha intuición. En particular, los resultados indican que el 66 % del efecto total de IAMA sobre ECSU opera de forma indirecta a través de FELO, proporción que no resulta evidente sin un análisis mediacional formal. Asimismo, el comportamiento no lineal identificado —con rendimientos marginales decrecientes en niveles altos de implementación— es información útil para la toma de decisiones que la experiencia práctica por sí sola difícilmente podría cuantificar.

Además, los descubrimientos indican que la evolución en la IAMA no solo se asocia con mayores niveles de fiabilidad operativa de los dispositivos, sino que también contribuye a estructurar prácticas sistemáticas orientadas a la reducción de pérdidas. Este hallazgo resulta consistente con lo reportado por Bataineh et al. (2019), quienes identificaron una relación positiva entre mantenimiento autónomo y desempeño manufacturero; así como con Shannon et al. (2023), quienes señalaron que la integración de prácticas de mantenimiento en la rutina operativa favorece mejoras acumulativas en eficiencia. En este sentido, el papel mediador de FELO, observado en el modelo estructural, refuerza la idea de que las acciones de mantenimiento no impactan directamente en los resultados económicos de manera aislada, sino que operan a través de mecanismos intermedios vinculados con la gestión de pérdidas. La disminución de errores, interrupciones imprevistas y reprocesos se traduce en una mayor eficiencia y reducción de costos, pilares de la ECSU en entornos manufactureros competitivos.

Desde un punto de vista teórico, los resultados de este estudio incrementan la comprensión que se tiene del TPM como un sistema integrado de componentes técnicos y organizacionales. La relación que se ha encontrado entre IAMA, FELO y ECSU puede ser interpretada a través de la teoría de los recursos y capacidades, ya que es evidencia empírica de que la autonomía operativa, las buenas prácticas de mantenimiento y la integración de los recursos humanos son capacidades internas difíciles de imitar y que generan ventajas competitivas para las empresas (Barney, 1991). Estos mismos hallazgos concuerdan con otros sobre TPM, pero desde la perspectiva de la visión basada en recursos. En estos, se indica que las actividades y prácticas de mantenimiento son capacidades estratégicas que influyen en el desempeño organizacional (Samadhiya & Agrawal, 2024). Así pues, el IAMA no debe ser considerado solo como una práctica operativa, sino también como un recurso estratégico a disponibilidad del sistema productivo.

Adicionalmente, se han observado comportamientos no lineales en las relaciones entre algunas de las variables analizadas, donde los impactos suelen ser más grandes en las etapas iniciales e intermedias del proceso de adopción. Sin embargo, conforme se consolida el grado de madurez organizacional, los efectos tienden a disminuir o estabilizarse. Este comportamiento coincide con lo reportado por Singh y Awoke (2023), quienes señalan que la intensidad del impacto de las prácticas de TPM en el desempeño operacional es variante según el nivel de implementación que este tenga. De esa forma, brinda mejores resultados cuando se corrigen ineficiencias en etapas tempranas del proceso de adopción. Así, los resultados de este estudio son una evidencia empírica que aporta un conocimiento complementario al análisis lineal tradicional sugiriendo que la gestión del TPM requiere de enfoques diferenciados en función del desarrollo organizacional.

En el plano práctico, los resultados aportan implicaciones relevantes para la gestión del mantenimiento industrial. Se sugiere que el fortalecimiento del mantenimiento autónomo constituya una etapa previa y necesaria para la implementación de iniciativas más avanzadas de mejora enfocada con el objetivo de maximizar los beneficios derivados del TPM. Este planteamiento es consistente con estudios que han señalado la importancia de consolidar los pilares básicos del TPM antes de avanzar hacia esquemas más complejos de optimización operativa (Ahuja & Khamba, 2008; Singh & Awoke, 2023). Asimismo, el uso de herramientas analíticas, como la evaluación de escenarios de sensibilidad, puede apoyar la toma de decisiones orientadas a mejorar la eficiencia operativa y reducir riesgos asociados al desempeño productivo y financiero, tal como se ha documentado en investigaciones recientes sobre excelencia operacional en mantenimiento (Mohad et al., 2025).

## CONCLUSIONES

Los resultados del PLS-SEM han permitido evaluar de manera holística la IAMA, la FELO y la ENSU en el marco del TPM en el sector manufacturero. Los resultados permiten concluir que la participación del personal operativo de las máquinas en actividades básicas de mantenimiento se relaciona con una gestión eficiente de las pérdidas y las mejoras que se ven reflejadas a través de un mejor desempeño financiero. De la misma manera, se han identificado comportamientos no lineales en algunas de las relaciones, las cuales eran más notorias en etapas iniciales e intermedias y que tienden a estabilizarse al madurar su implementación.

Desde un punto de vista teórico, los resultados de este estudio indican que el TPM es una herramienta de manufactura esbelta que puede combinar aspectos sociales y técnicos facilitando la integración de los recursos humanos y las tecnologías disponibles para incrementar el rendimiento organizacional. Según la teoría de los recursos y capacidades, la autonomía de las operaciones, las buenas prácticas del mantenimiento y el enfoque y aprendizaje para eliminar pérdidas del proceso productivo son capacidades internas. Estas,

cuando se fortalecen, mejoran la estabilidad del proceso y facilitan el uso eficiente de los recursos, lo que trae como consecuencia un mejor desempeño económico.

En la práctica, los resultados indican que mejorar el mantenimiento autónomo es fundamental para implementar estrategias más avanzadas que busquen mejoras específicas y eliminen pérdidas. Implementar estas prácticas poco a poco puede ayudar a disminuir errores, tiempos perdidos y gastos operativos sin necesidad de realizar inversiones tecnológicas de inmediato. Esto es especialmente relevante en entornos de fabricación donde hay limitaciones de recursos y la necesidad de mantener un nivel constante de productividad.

Sin embargo, al interpretar los resultados, se debe tener en cuenta la metodología del estudio. Como se trata de un diseño transversal, no se puede analizar cómo cambian a lo largo del tiempo los efectos del TPM ni identificar con claridad las dinámicas de madurez ni los efectos acumulativos. Por eso, investigaciones futuras podrían emplear diseños longitudinales para observar cómo se implementan las medidas y estimar cambios en el desempeño económico con el tiempo. Además, como el análisis se centró en empresas manufactureras de Ciudad Juárez, México, los resultados dependen de características específicas de la región y de las organizaciones. Por lo tanto, se sugiere ampliar el área geográfica y los sectores a evaluar para comprobar la estabilidad del modelo en diferentes contextos productivos y mejorar su validez externa.

Asimismo, el estudio se basó en datos perceptuales, lo cual es consistente con la naturaleza latente de los constructos y ha sido validado estadísticamente. No obstante, futuras investigaciones podrían complementar estos hallazgos con indicadores operativos directos —como tasas de fallo u OEE— para triangular la evidencia y fortalecer la validez externa del modelo. Asimismo, el estudio no incluyó una medición del nivel de madurez en TPM ni del grado de adopción de pilares específicos en las empresas participantes, por lo que futuros estudios podrían incorporar estos criterios como variables de control o segmentación.

Finalmente, el modelo se centró en el aspecto económico de la sostenibilidad. Esto permitió que el modelo sea más simple y facilitó su estimación, pero limitó la comprensión completa del impacto del TPM. En este sentido, futuras investigaciones podrían ampliar el modelo para incorporar otros pilares del TPM —como el mantenimiento planificado, la mejora enfocada o las 5S—, así como dimensiones sociales, ambientales y tecnológicas. Esta expansión permitiría investigar más a fondo las condiciones en las que el TPM contribuye a una sostenibilidad industrial más efectiva y a resultados organizacionales sostenibles a largo plazo.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

**José Darío Vázquez Martínez:** conceptualización, *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, visualización, escritura-borrador original, redacción: revisión y edición. **Jorge Luis García Alcaraz:** conceptualización, análisis formal, metodología, supervisión, validación, redacción: revisión y edición. **José Luis Peinado Portillo:** supervisión, redacción: revisión y edición.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE IA GENERATIVA

Los autores utilizaron herramientas de IA generativa únicamente para mejorar la redacción, gramática y claridad del manuscrito. La interpretación de resultados, análisis y conclusiones corresponden exclusivamente a los autores.

## REFERENCIAS

- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Total productive maintenance: Literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25(7), 709–756. <https://doi.org/10.1108/02656710810890890>
- Al-refaie, A., Lepkova, N., & Camilbel, M. E. (2022). The relationships between the pillars of TPM and TQM and manufacturing performance using structural equation modeling. *Sustainability*, 14(3), 1497. <https://doi.org/10.3390/su14031497>
- Au-Yong, C. P., Azmi, N. F., & Myeda, N. E. (2022). Promoting employee participation in operation and maintenance of green office building by adopting the total productive maintenance (TPM) concept. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131608. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131608>
- Badghish, S., & Soomro, Y. A. (2024). Artificial Intelligence Adoption by SMEs to Achieve Sustainable Business Performance: Application of Technology–Organization–Environment Framework. *Sustainability*, 16(5), 1864. <https://doi.org/10.3390/su16051864>
- Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99–120. <https://doi.org/10.1177/014920639101700108>
- Bataineh, O., Al-Hawari, T., Alshraideh, H., & Dalalah, D. (2019). A sequential TPM based scheme for improving production effectiveness presented with a case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(1), 144-161 <https://doi.org/10.1108/JQME-07-2017-0045>
- Braglia, M., Frosolini, M., & Zammori, F. (2008). Overall equipment effectiveness of manufacturing lines (OEEML): An integrated approach to assess systems

- performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(1), 8-29. <https://doi.org/10.1108/17410380910925389>
- Chundhoo, V., Chattopadhyay, G., Karmakar, G., & Appuhamillage, G. K. (2025). Embedding risk in total productive maintenance model. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 16, 1645-1662. <https://doi.org/10.1007/s13198-025-02736-1>
- Escobal, P., Gonzales, A., & Chavez-Ugaz, R. (2025). Productivity Improvement in a Canned Fish Production Company Applying 5S, TQM, and Three Pillars of TPM Tools. En L. C. Tang (Ed.), *Proceedings of the 11th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA 2024)* (pp. 131–144). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-6492-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-97-6492-1_11)
- García-Alcaraz, J. L., Morales-García, A. S., Díaz-Reza, J. R., Jiménez-Macías, E., Javierre-Lardies, C., & Blanco-Fernández, J. (2022). Effect of lean manufacturing tools on sustainability: the case of Mexican maquiladoras. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(26), 39622-39637. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18978-6>
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2016). *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)*. Sage Publications.
- Kock, N. (2023). *WarpPLS 8.0 user manual*. ScriptWarp Systems.
- Mohad, F. T., Gomes, L. C., Tortorella, G. L., & Lermen, F. H. (2025). Operational excellence in total productive maintenance: statistical reliability as support for planned maintenance pillar. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 42(4), 1274–1296. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2023-0290>
- Morales Méndez, J. D., & Rodríguez, R. S. (2017). Total productive maintenance (TPM) as a tool for improving productivity: A case study of application in the bottleneck of an auto-parts machining line. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 1013–1026. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0052-4>
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to total productive maintenance (TPM)*. Productivity Press.
- Samadhiya, A., & Agrawal, R. (2024). Total productive maintenance and sustainability performance: Resource-based view perspective. *Benchmarking: An International Journal*, 31(7), 2177–2196. <https://doi.org/10.1108/BIJ-10-2022-0635>
- Samadhiya, A., Agrawal, R., & Garza-Reyes, J. A. (2023). Investigating the influence of total productive maintenance key success factors on the social sustainability dimension of manufacturing SMEs. *Benchmarking: An International Journal*, 30(10), 4651–4680. <https://doi.org/10.1108/BIJ-05-2022-0287>

- Santos, R. M., Sassi, A. C., Sá, B. M., Miguez, S. A., & Pardauil, A. A. (2012). Ergonomics Program Management in Tucuruí Hydropower Plant using TPM methodology [Conference paper]. *Work*, 41, 2822-2830. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0530-2822>
- Shannon, N., Trubetskaya, A., Iqbal, J., & McDermott, O. A. (2023). A total productive maintenance and reliability framework for an active pharmaceutical ingredient plant utilising design for Lean Six Sigma. *Heliyon*, 9(10), e20516. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20516>
- Singh, A. P., & Awoke, N. F. (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>
- Singh, R. K., & Gurtu, A. (2022). Prioritizing success factors for implementing total productive maintenance (TPM). *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 28(4), 810–830. <https://doi.org/10.1108/JQME-09-2020-0098>

# ENHANCING PRODUCTIVITY AND MINIMIZING WELDING DEFECTS IN STEEL MESH MANUFACTURING THROUGH THE IMPLEMENTATION OF A PHYSICAL POKA-YOKE DEVICE

JESÚS CRUZ GARZA MORENO\*  
<https://orcid.org/0000-0002-3280-7197>

LUZ IDALIA BALDERAS GARCÍA  
<https://orcid.org/0000-0002-8187-3203>

YADIRA ARACELY FUENTES RUBIO  
<https://orcid.org/0000-0002-7385-9794>

AZAHEL TREVIÑO VILLEGAS  
<https://orcid.org/0009-0007-5895-6899>

LOURDES YAJAIRA GARCÍA RIVERA  
<https://orcid.org/0000-0001-5985-405X>

Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Rodhe,  
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México

Received: February 24, 2026 / Accepted: April 8, 2026

Published: June 15, 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8628>

**ABSTRACT.** This study assesses the implementation of a physical poka-yoke device on an electric welding machine used for producing steel mesh wire production at WMC (Wire Mesh Corp). The goal is to eliminate defects caused by improper transverse wire insertion and to enhance productivity. A quantitative field study was conducted using Lean Manufacturing methodologies, including the 5 Whys technique for root cause analysis and structured checklists for continuous monitoring. This poka-yoke device

---

This research received no external funding.

\* Corresponding author.

Author e-mails in order of appearance: [jesus.garza@uat.edu.mx](mailto:jesus.garza@uat.edu.mx); [luz.balderas@docentes.uat.edu.mx](mailto:luz.balderas@docentes.uat.edu.mx); [yfuentes@uat.edu.mx](mailto:yfuentes@uat.edu.mx); [azahel.trevino@docentes.uat.edu.mx](mailto:azahel.trevino@docentes.uat.edu.mx); [ygarcia@docentes.uat.edu.mx](mailto:ygarcia@docentes.uat.edu.mx)

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

was engineered to reinforce the transversal support mechanism, thereby ensuring wire stability and preventing deformation during welding. The results demonstrated a 100 % elimination of defective meshes and a 23,68 % increase in productivity. Prior to the implementation, defect rates averaged 39,5 % per shift, accompanied by recurrent machine downtime. Following the installation, all produced meshes adhered to quality specifications, with no defects detected during the evaluation period. These findings affirm that simple, cost-effective error-proofing mechanisms can significantly optimize manufacturing processes within the steel industry, providing a replicable framework for future industrial poka-yoke applications.

KEYWORDS: poka-yoke / electric welding / five whys / productivity / optimization / lean manufacturing

## IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE POKA-YOKE PARA REDUCIR DEFECTOS DE SOLDADURA Y AUMENTAR LA PRODUCTIVIDAD EN UN PROCESO DE FABRICACIÓN DE MALLA DE ACERO

RESUMEN. El presente estudio expone la implementación de un dispositivo *poka-yoke* en una máquina de soldadura eléctrica para fabricación de malla de acero con el objetivo de eliminar defectos por inserción incorrecta del alambre transversal y optimizar la productividad. Mediante un enfoque cuantitativo de campo, se aplicaron herramientas de manufactura esbelta: 5 porqués para el análisis de causas raíz y listas de verificación para el monitoreo. El dispositivo reforzó el soporte transversal, previniendo deformaciones durante la soldadura. Los resultados mostraron una reducción total de mallas defectuosas y un incremento del 23,68 % en productividad. La tasa de defectos, que antes era del 39,5 % por turno, se redujo a cero, cumpliendo todas las mallas con especificaciones de calidad. Con ello, se confirma que soluciones *poka-yoke* simples y rentables mejoran procesos industriales en el sector del acero.

PALABRAS CLAVE: *poka-yoke* / soldadura eléctrica / cinco porqués / productividad / optimización / manufactura esbelta

## INTRODUCTION

The steel industry significantly contributes to global infrastructure development, particularly through the utilization of electro-welded steel mesh as reinforcement in various construction projects, including floors, pavements, bridges, and buildings (Arroyo et al., 2021; Carrillo et al., 2019). Electro-welded mesh comprises corrugated or smooth steel wire rods that are joined through resistance welding to create a grid structure, which enhances the structural strength and stability of reinforced concrete systems (Miranda-Giraldo et al., 2024). Its high strength-to-weight ratio and mechanical reliability render this material an indispensable component in contemporary construction applications that demand durable and efficient structural reinforcement (Dorota Rymaszewska, 2014).

A critical requirement in the production of electro-welded mesh is maintaining dimensional accuracy and proper weld integrity, as these characteristics directly influence the structural performance and safety of construction elements (Chattopadhyay et al., 2011). However, ensuring consistent welding quality is challenging in industrial environments, particularly when production involves varying wire diameters and mechanical loads. In such instances, process variability and mechanical limitations can result in misalignment, defective welds, and production interruptions, ultimately leading to increased operational costs and material waste.

Beyond the operational challenges, manufacturing defects in steel reinforcement materials present significant broader implications. From an industrial perspective, welding defects lead to increased production inefficiencies, generate scrap, and result in frequent machine stoppages that diminish productivity. Environmentally, defective products contribute to excessive consumption of raw materials and energy, undermining the growing emphasis on sustainable manufacturing practices. Additionally, enhancing the reliability and quality of structural reinforcement materials plays a crucial role in promoting the safety and durability of civil infrastructure systems.

Lean Manufacturing principles have gained widespread adoption as organizations seek to address production challenges by minimizing waste and enhancing process reliability. Among these principles, the poka-yoke (error-proofing) methodology—originally developed by Shigeo Shingo within the Toyota Production System—emphasizes preventing errors at their source through simple, cost-effective mechanisms (Saurin et al., 2012). Poka-yoke devices are specifically designed to either prevent incorrect operations or immediately detect deviations, thereby facilitating corrective actions before defects propagate through the production system (Dudek-Burlikowska & Szewieczek, 2009). In contrast to traditional quality control methods that rely on post-process inspection, poka-yoke systems strive to achieve “zero defects” by incorporating error prevention directly into the production process.

The use of poka-yoke techniques has been extensively documented across various manufacturing sectors, including automotive, electronics, and assembly systems, where error-proofing mechanisms effectively reduce defect rates and enhance operational performance (Alexander et al., 2019; Komkowski et al., 2023). However, despite the wealth of literature on poka-yoke applications, research on its implementation in heavy steel manufacturing processes remains relatively sparse, particularly for the production of electro-welded mesh formed from large-diameter wires. This gap in research is significant, given the mechanical complexities associated with welding thick-gauge steel wires and the potential productivity losses stemming from process errors in such environments.

This study investigates a specific production problem at a WMC manufacturing facility in The Woodlands, Texas. The facility's electro-welded mesh production, which utilizes 13 mm transversal wires, has encountered frequent welding defects and recurring machine stoppages. The root cause of these issues is linked to the deformation of the transversal support mechanism during the manual insertion of thick wires, leading to misalignment and defective welds. Consequently, the production process has suffered significant productivity losses, characterized by frequent machine interruptions and elevated defect rates.

To address this issue, this research proposes the design and implementation of a physical poka-yoke device specifically engineered to prevent deformation of the transversal support mechanism during the insertion of the wire. By reinforcing the mechanical stability of the support structure, the proposed device ensures proper wire alignment during welding operations, thereby eliminating the principal source of defects.

The objectives of this research are as follows:

1. To design and implement a physical poka-yoke device capable of preventing deformation of the transversal support mechanism during the insertion of thick steel wires.
2. To eliminate welding defects associated with misalignment in the production of electro-welded mesh.
3. To enhance overall production efficiency by reducing machine downtime.
4. To contribute empirical evidence to the existing literature regarding the efficacy of simple mechanical poka-yoke solutions in heavy manufacturing environments.

This study addresses a practical industrial challenge by applying Lean Manufacturing principles, thereby making significant contributions to both academic literature and industrial practice. The findings illustrate that simple, low-cost error-proofing mechanisms can substantially enhance process reliability and productivity within steel manufacturing environments. Furthermore, the results provide a replicable framework for implementing poka-yoke solutions across various manufacturing contexts where mechanical limitations often lead to defects.

## LITERATURE REVIEW

Poka-yoke, a Japanese term that translates to “mistake-proofing,” represents a philosophy and a set of techniques formulated by Shigeo Shingo as an integral component of the Toyota Production System (Saurin et al., 2012). The core principle of poka-yoke involves the prevention of defects through the design of devices or mechanisms that economically mitigate human or process errors, thereby avoiding the production of defective products (Alexander et al., 2019). In contrast to traditional quality systems that emphasize inspection to identify failures post-occurrence, poka-yoke promotes “inspection at the source.” This approach facilitates immediate feedback and corrective actions, effectively halting processes the moment an abnormality arises. Consequently, poka-yoke emerges as a fundamental tool within lean manufacturing, aligning with the goals of achieving zero defects and eliminating waste (Dudek-Burlikowska & Szewieczek, 2009).

The existing literature classifies poka-yoke systems in several ways to enhance their understanding and application. One of the most prevalent classifications, based on function, distinguishes between control methods and warning methods (Komkowski et al., 2023). Control methods represent the most robust approach, as they halt the process entirely upon detecting an error, thereby physically preventing the progression of the defective part. Conversely, warning methods employ signals, such as lights or alarms, to notify the operator of an abnormality, relying on their intervention to rectify the issue. Another classification that focuses specifically on detection identifies three main approaches: the contact method, which verifies the presence of a physical attribute; the step or motion method, which confirms that a specific number of actions have been executed; and the fixed-value method, which utilizes sensors to count the repetitions of an operation or validate parameters (Cerchione & Esposito, 2016). The versatility of these classifications enables the adoption of poka-yoke devices to both existing processes, where defects are already identified, and new processes, where designers must proactively anticipate potential failures (Dudek-Burlikowska & Szewieczek, 2009).

The adoption of poka-yoke has significantly increased across various industrial processes, particularly in the automotive and electronics industries. This study specifically examines welding processes, where researchers have reported notable improvements. Wan Saidin and his colleagues (2015) created a “roller coaster” style jig for nut welding operations. This innovation successfully eliminated alignment errors during the evaluation period and resulted in an impressive 98 % reduction in downtime costs. More recently, Cosme-Rodriguez et al. (2025) implemented an Internet of Things (IoT)-based poka-yoke system to monitor spot welding stations in the manufacturing of electrical transformers. Their integration of sensors and microcontrollers resulted in defect rates approaching zero, underscoring the effectiveness of digital solutions. These cases illustrate a clear contrast with purely mechanical solutions and emphasize the extensive range of possibilities that poka-yoke presents, from straightforward implementations to advanced technological applications.

The evolution of the concept has facilitated its integration with Industry 4.0 technologies. Emerging literature indicates that combining poka-yoke with the analysis of large volumes of data, commonly referred to as big data, enables the proactive identification of error patterns and facilitates real-time process optimization (Gupta et al., 2020). This synergy not only allows for prompt reactions to errors but also enhances the ability to predict conditions that may lead to their occurrence. Despite these digital advances, practitioners in the field and various scholars concur that the most effective poka-yoke solutions are those characterized by simplicity, cost-effectiveness, and adaptability to the specific conditions of each process, without necessitating significant modifications to existing equipment (Dudek-Burlikowska & Szewieczek, 2009; Saurin et al., 2012).

Finally, the successful implementation of poka-yoke is intrinsically linked to various problem-solving and continuous improvement tools characteristic of Lean Manufacturing. Conducting root cause analysis, particularly through techniques such as the “5 Whys,” serves as a fundamental preliminary step in designing devices that address the root of problems rather than merely their symptoms (Helo et al., 2025). Furthermore, the long-term sustainability of improvements relies on fostering a culture of quality wherein operators actively engage in maintaining mistake-proofing systems, often through the use of checklists that institutionalize preventive inspection routines (Cerchione & Esposito, 2016; Garza Moreno et al., 2024). This research builds upon this established conceptual framework, applying poka-yoke principles to an area with limited specific documentation—the manufacturing of electro-welded steel mesh with large-gauge wire. This approach demonstrates how a systematic approach combined with the implementation of simple physical devices can yield substantial enhancements in both quality and productivity.

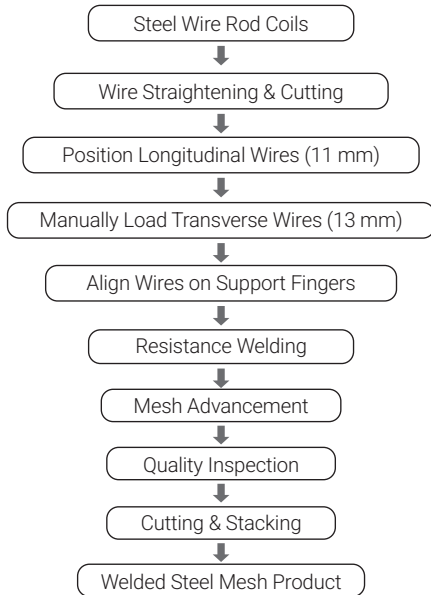
## METHODOLOGY

This study employs a quantitative field research approach using a before-and-after quasi-experimental design, conducted in a real industrial production environment. This research design enables the evaluation of the impact of a process intervention by comparing key operational indicators before and after implementing the poka-yoke device, all while maintaining comparable operating conditions within the production system.

The research took place in a steel mesh manufacturing facility operated by WMC in The Woodlands, Texas, where electro-welded mesh is produced using a Beaumont MEP#1 resistance welding machine (Model D20X08). The focus of the study centers on the production of meshes crafted with 13 mm-diameter transverse steel wires, which have been linked to frequent welding defects and recurrent machine stoppages caused by insertion misalignment. The following figure (Figure 1) illustrates the general production flow of electro-welded steel mesh utilizing the Beaumont welding machine.

**Figure 1**

*Steel mesh production process using Beaumont MEP#1*



**Research Framework**

The methodological structure of this research adheres to a six-phase improvement framework, adapted from Lean Manufacturing implementation models commonly utilized in studies of industrial process improvement (Buer et al., 2020). This framework entails integrating problem identification, root cause analysis, solution design, and performance monitoring to facilitate a systematic implementation of the poka-yoke system.

**Table 1**

*The six phases of the framework are summarized in this table*

Phase	Description
Phase 1	Documenting the problem through production records and machine downtime logs.
Phase 2	Conducting root cause analysis using the 5 Whys technique.
Phase 3	Evaluating and selecting alternative solutions.
Phase 4	Designing the mechanical components of the poka-yoke device.
Phase 5	Installing the device and implementing a pilot program.
Phase 6	Monitoring and standardizing processes using operational checklists.

This structured approach ensures that the proposed solution targets the root cause of the problem rather than merely its symptoms, a fundamental principle of Lean Manufacturing methodologies.

### Root Cause Analysis

To identify the underlying cause of the welding defects observed in the production process, we conducted a 5 Whys root cause analysis. The 5 Whys technique serves as a widely utilized problem-solving tool within Lean Manufacturing, employing iterative questioning to trace operational problems back to their fundamental causes (Helo et al., 2025).

Through this structured questioning process, the analysis revealed that the primary cause of the defects was the deformation of the transversal support fingers during the insertion of 13 mm steel wires. The original support structure, designed for smaller wire diameters, lacked sufficient mechanical resistance for the thicker wires, leading to misalignment prior to welding. The complete 5 Whys analysis is presented in Table 2.

**Table 2**

*Implementation of the 5 Whys*

Why level	Question	Answer
Why 1	Why were the transverse wires misaligned?	The support fingers that held the transverse wires were deforming prior to welding.
Why 2	Why were the support fingers deformed?	The weight and rigidity of the 13 mm transverse wires surpassed the mechanical capacity of the original supports.
Why 3	Why did the supports fail to withstand the load of the 13 mm wires?	The original support design was intended for smaller wire diameters and lower mechanical loads.
Why 4	Why was the original design still employed for larger wire diameters?	The machine had not been structurally adapted following the transition to thicker wires.
Why 5 (Root Cause)	Why was no modification made to the support system?	The requirement for reinforced supports had not been identified during the transition process to larger wire diameters.

### Design and Implementation of the Poka-Yoke Device

Based on the findings from the root cause analysis, we designed a mechanical poka-yoke solution to prevent deformation of the transversal support mechanism during wire insertion. This device consists of a reinforced structural steel bracket with a thickness of 6 mm, which we installed on the original support structure using high-strength bolts.

Featuring an inverted L-shaped geometry, the device enhances structural rigidity at the critical point where the transversal wire rests prior to welding. This reinforcement effectively

prevents the support from bending during the manual insertion of thick wires, ensuring the wire remains aligned with the welding electrodes.

The poka-yoke functions as a control-type error-proofing mechanism, physically preventing incorrect positioning of the wire rather than merely issuing a warning to the operator. This design aligns with the classification proposed by Shingo's poka-yoke framework, where control methods offer more robust error prevention compared to warning-based systems.

We installed the device during scheduled machine maintenance to minimize production disruptions. Following the installation, we conducted a pilot production shift to verify its operational effectiveness prior to entering the formal monitoring phase.

### Data Collection

Both statistical and operational considerations informed the selection of 30 shifts for each observation period. From a statistical perspective, a sample size of  $n = 30$  is widely regarded as sufficient to invoke the Central Limit Theorem (CLT), which asserts that the sampling distribution of the mean approximates a normal distribution, irrespective of the underlying population distribution, provided the sample size is sufficiently large (Chang & Lee, 2017). This principle facilitates the application of parametric statistical tests and ensures that the sample mean serves as a reliable estimate of the population parameters. The CLT threshold of  $n \geq 30$  has been extensively utilized in industrial engineering research, particularly in quasi-experimental designs that evaluate process improvements in manufacturing environments (Cha & Cho, 2015).

From an operational viewpoint, the 30-shift period corresponds to a complete production cycle within the facility's scheduling system, thereby capturing the full range of natural process variability, including changes in operator shifts, variations in material batches, and alterations in routine machine conditions. This approach is consistent with established methodological practices in Lean Manufacturing research, where pre- and post-intervention comparisons typically employ sample sizes of 25 to 35 production cycles in order to ensure representativeness and statistical validity (Quiroz-Flores et al., 2023; Saurin et al., 2012). Consequently, the selected sample size provides adequate statistical power to detect meaningful differences in defect rates and productivity while also maintaining practical feasibility within the industrial setting.

### Productivity Measurement

To calculate process productivity, we used the following equation:

$$Productivity = \frac{total\ meshes\ per\ shift}{hours\ worked\ per\ shift} \quad (1)$$

This metric quantifies the number of meshes produced per hour and serves as the primary operational indicator for evaluating performance improvements resulting from poka-yoke implementation.

The calculation of the percentage improvement in productivity was conducted using the following formula:

$$Productivity\ Increase\ (\%) = \left( \frac{P_{after} - P_{before}}{P_{before}} \right) 100\ \% \quad (2)$$

Where:

- P\_before represents average productivity before the implementation.
- P\_after represents average productivity after the implementation.

### Data Analysis

The research team employed descriptive statistical methods to analyze differences in production performance before and after the implementation of the poka-yoke device. Key indicators assessed include:

- average production per shift.
- defect rate per shift.
- machine downtime associated with transversal wire insertion errors.
- productivity measured in meshes per hour.

These indicators facilitate an assessment of the operational impact of the poka-yoke system on both quality performance and production efficiency.

This analysis provides empirical evidence regarding the effectiveness of the proposed error-proofing mechanism in eliminating welding defects and enhancing productivity within the steel mesh manufacturing process.

## RESULTS

Based on the research conducted through the application of the 5 Whys technique, we found the root cause to be insufficient mechanical strength of the supports to handle 13 mm wires. This section will detail the results obtained from implementing the poka-yoke system within the project.

Upon identifying the root cause, we implemented a physical control poka-yoke to prevent the error rather than merely providing a warning. This implementation method

physically reinforces the support to maintain the correct position. The device consists of a 6 mm thick steel reinforcement that is affixed to the existing supports using high-strength bolts. Its inverted "L"-shaped design offers additional rigidity at the critical point where the 13 mm wires rest, effectively acting as a "stop" that prevents bending deformation during manual wire insertion.

The operating principle was to maintain the original geometry of the reinforced support when inserting the transverse wire. This is to ensure the wire is exactly in the predetermined position for welding. Should the operator try to force the wire out of position, the inherent rigidity of the device would physically obstruct such a movement.

For the research results, the study employed a production line for welded wire mesh utilizing a Beaumont machine welder MEP#1, model D20X08, at the WMC company in Woodland, Texas.

Observations prior to the implementation of poka-yoke revealed an average production of 84 meshes over an 11-hour shift, yielding only 52 finished products. This resulted in 34 defective meshes, reflecting a defect rate of 39,5 % per shift ( $34/84 = 0,395$ ), indicating that approximately 2 out of every 5 meshes produced exhibited welding defects. Following the implementation of poka-yoke, the average production increased to 104 meshes with no defective items reported.

### **Implementation Outcomes**

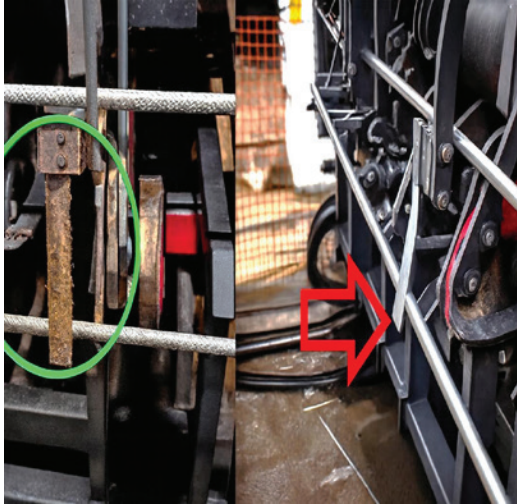
The installation of the physical poka-yoke device proceeded successfully without necessitating modifications to other machine components. The implementation yielded favorable outcomes, as it effectively eliminated 100 % of the main issue. Prior to its implementation, the production process resulted in a significant number of poorly welded meshes; specifically, for every five meshes produced, two contained errors. Additionally, the process led to lost time due to inadequate wire insertion, which caused machine stoppages.

### **Poka-yoke implemented**

The implementation of the poka-yoke was executed successfully without altering the machine's operation, and personnel visually verified that the transverse wire was positioned appropriately for insertion, as illustrated in Figure 2.

**Figure 2**

*Poka-yoke implementation on the Beaumont welder machine*



**Test**

To assess the functionality of the implemented device, it is essential to conduct a pilot test. This approach enables the verification of error-free operation throughout an entire shift, leading to the manufacturing of a finished product that meets the required specifications.

Figure 3 illustrates the before-and-after of the finished product following the implementation.

**Figure 3**

*Comparison of the finished product*

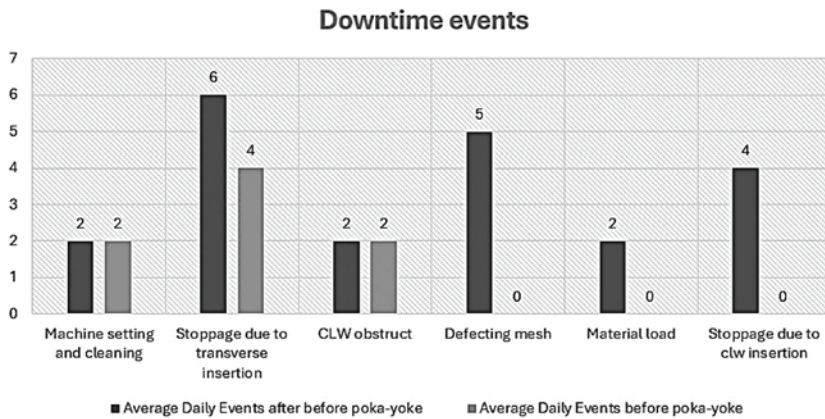


### Production results

At this juncture, this section will critically analyze the impact on production following the implementation of the device. As stated earlier in this article, the introduction of the device successfully eliminated 100 % of the identified issues. Figure 4 presents a comparative report of production issues, measured in minutes, before and after the integration of the poka-yoke system, highlighting that the majority of machine stoppages resulted from the insertion of transversals. Additionally, Figure 5 illustrates the downtime events recorded prior to and following the implementation.

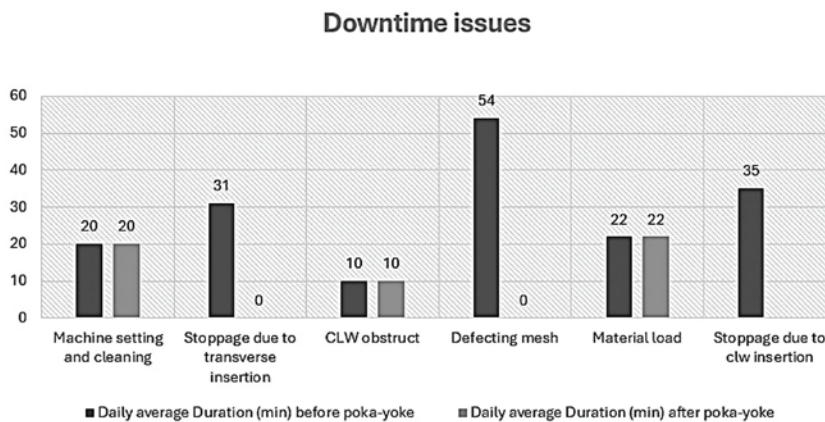
**Figure 4**

*Production downtime issues in minutes before and after the poka-yoke device*



**Figure 5**

*Comparison of the average stoppage events before and after*



Productivity (total meshes per shift)/(machine hours worked per shift)

Productivity before implementation:

Productivity= (84)/(11) =7,6 meshes per hour worked.

Productivity after implementation:

Productivity=104/11=9,4 meshes per hour worked.

Based on the previous results, the percentage increase in productivity, calculated using the formula below, is 23,68 %.

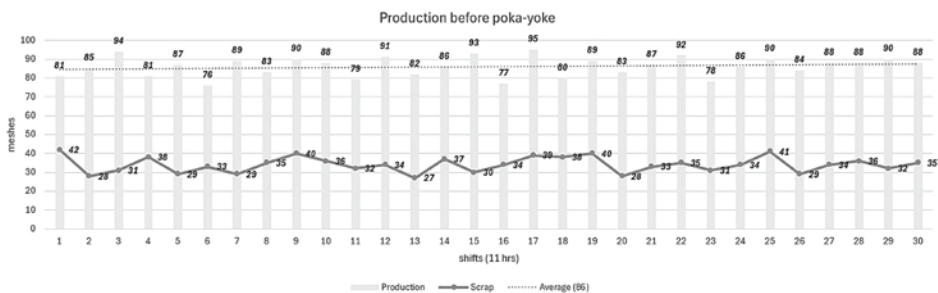
Percentage Increase= (P.after -P.before) ÷ P. before x 100

Per= (9,4 - 7,6)/7,6 × 100 = 23,68 %

Figures 6 and 7 show the total number of defective meshes per shift before and after the implementation of the poka-yoke system, based on previous production reports. These reports demonstrate a complete reduction of 100 % in defective meshes following the implementation. The system achieves an average of zero defective meshes per shift. Additionally, Figure 8 illustrates the format utilized to track the implementation process.

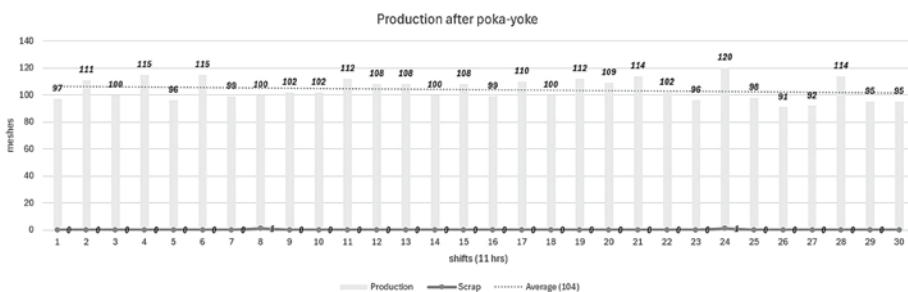
**Figure 6**

*Comparison of the production vs scrap before poka-yoke*



**Figure 7**

*Comparison of the production vs scrap after poka-yoke*



**Figure 8**

*Checklist after implementation of poka-yoke*

REINFORCED SUPPORT INSPECTION CHECKLIST

Date	Shift	Machine	Operator
Supervisor	Production Line	Inspection Time	Document No.

No.	Inspection Item	Status (OK / NOT OK)	Comments
1	Visual inspection of the three reinforced supports (no deformation, cracks, or visible wear)		
2	Verification of fastening bolts (properly tightened)		
3	Insertion test with a 13 mm wire (wire must slide smoothly and remain aligned)		
4	Observation of the first welding cycle (confirm no abnormal vibrations)		
5	Record any anomaly in the incident log		

Operator Name & Signature	Supervisor Name & Signature

**DISCUSSION**

The implementation of the poka-yoke device on the electric welding machine yielded significant benefits for WMC by eliminating welding defects and enhancing productivity by 23,68 %. These findings align with those reported by Wan Saidin et al. (2015), who employed a roller-coaster jig in a nut welding operation, which resulted in a decrease in alignment errors. In both instances, the incorporation of a physical mechanical restriction element effectively prevented errors at their source, thereby avoiding the generation of defective products and minimizing machine downtime. Notably, this study achieved a complete 100 % reduction in defects, which likely stems from the specific nature of the addressed problem: a mechanical insertion error that can be entirely prevented through structural reinforcement, as opposed to more complex errors involving multiple variables.

The results align with the observations of Cosme-Rodriguez et al. (2025), who integrated an IoT-based poka-yoke system for spot welding stations, thereby achieving near-zero defect rates. However, although their approach necessitated the use of sensors, microcontrollers,

and connectivity, the solution implemented in this study was purely mechanical, low-cost, and easy to install. This finding supports the argument advanced by Dudek-Burlikowska and Szewieczek (2009) that the most effective poka-yoke devices are typically simple, economical, and adaptable to existing processes without requiring significant modifications. Such simplicity not only facilitates adoption in industrial environments with limited resources but also encourages long-term sustainability by minimizing reliance on electronic components that may fail or become obsolete.

The application of the 5 Whys method facilitated the identification of the root cause: the deformation of the transversal support, which arose from insufficient mechanical strength to accommodate thick-gauge wires (13 mm). This finding aligns with existing literature that underscores the effectiveness of this technique in addressing seemingly complex problems within manufacturing environments (Helo et al., 2025). Integrating root cause analysis with the design of a physical poka-yoke device represents a cohesive approach, as recommended by several authors (Alexander et al., 2019; Saurin et al., 2012). This integrated strategy has proven to be practical in the current context.

In terms of productivity, the 23.68 % increase aligns with the findings of previous studies that applied Lean Manufacturing tools to welding processes. However, this study exclusively measured productivity as pieces per hour, omitting other important indicators such as cost per unit and Overall Equipment Effectiveness (OEE). Future research should aim to incorporate these additional metrics to provide a more comprehensive understanding of the impact of such interventions (Quiroz Flores et al., 2023).

A distinctive aspect of this study is the active incorporation of daily checklists as a mechanism for monitoring and preventive maintenance. Although this practice may appear straightforward, Cerchione and Esposito (2016) identify it as a pivotal tool for sustaining process improvements, as it engages operators in the early detection of deviations. The operators' acceptance of and active participation in completing the checklists exemplify Shingo's philosophy of respecting worker intelligence while equipping them with the necessary tools to prevent errors (Saurin et al., 2012). Future studies should quantitatively assess adherence to these procedures and examine their correlation with the maintenance of results, as such an analysis would provide valuable insights.

In terms of the solution's scalability, the device demonstrated effectiveness not only for the original wire gauge (13 mm) but also with various other gauges utilized within the plant. This finding indicates that the design can readily adapt to different product specifications without necessitating substantial modifications. Such flexibility aligns with the poka-yoke design principles articulated by Komkowski et al. (2023), who emphasize the importance of developing modular, adjustable solutions. Nevertheless, conducting a longitudinal study is essential to evaluate the device's durability under continuous operating conditions and to assess its performance across varying usage frequencies.

Despite the positive results, the study presents several limitations that warrant consideration. First, the evaluation took place in a single facility with specific equipment configurations, which limits the generalizability of the findings to other plants or types of welding machines. Second, the observation period following implementation lasted 30 shifts. While this duration is adequate for detecting immediate improvements, it does not facilitate an assessment of the sustainability of results in the medium to long term. Furthermore, research conducted by Buer et al. (2020) indicates that the effects of Lean Manufacturing interventions can diminish over time unless they are supported by continuous improvement programs and periodic training.

One limitation of the study is its exclusive focus on a specific type of defect: the incorrect insertion of the transversal wire. Although this defect represents the most critical issue in terms of frequency and impact, the research does not account for other potential sources of defects in the mesh welding process, such as variations in welding current, electrode wear, or longitudinal wire tension. Future research should examine the integration of multiple poka-yoke devices or real-time monitoring systems to address process quality comprehensively.

From a broader perspective, the study contributes to the body of knowledge on the application of poka-yoke in the steel industry, which remains underexplored compared to sectors such as automotive and electronics (Gupta et al., 2020). The evidence presented indicates that Lean Manufacturing principles are fully transferable to this context and can yield significant improvements with minimal investments. This finding is particularly pertinent to small and medium-sized enterprises in the sector, which frequently encounter budget constraints when adopting advanced technologies.

Finally, it is important to emphasize that integrating poka-yoke with other Lean Manufacturing tools, such as root cause analysis and checklists, establishes a comprehensive framework that not only addresses immediate challenges but also promotes a culture of quality and continuous improvement. As Rizos et al. (2025) indicate, the sustainability of Lean Manufacturing improvements relies significantly on the active engagement of operators and the institutionalization of monitoring and feedback practices. In this context, the present study provides a replicable model that can be adapted to various manufacturing processes experiencing recurring mechanical defects that compromise quality and productivity. In conclusion, the analysis of the results demonstrates that well-designed and straightforward poka-yoke solutions can profoundly influence the quality and efficiency of industrial processes. The comparison with previous studies strengthens the validity of the findings and highlights the need to tailor solutions to the specific characteristics of each process. Furthermore, the limitations identified in this study present opportunities for future research that explores the integration of digital technologies, durability analysis, and the assessment of the organizational impact of such interventions.

## CONCLUSION

The implementation of the poka-yoke system in the electrowelding process significantly enhanced product quality and operational efficiency, fully aligning with customer requirements and order specifications. The reinforced support bracket effectively addressed the mechanical limitation associated with the insertion of transversal wires, thereby enabling consistent production of defect-free meshes. As a result, productivity increased by 23.68 % per shift, and the elimination of defective meshes confirmed the successful attainment of the research objectives.

The device proved particularly effective in handling thick-gauge transversal wires. Furthermore, its adaptability across various production orders, without necessitating modifications to the support structure, underscores its scalability and practical relevance. To ensure sustained performance, the team introduced a checklist to facilitate periodic inspections and timely replacements, thereby preventing long-term disruptions and embedding preventive maintenance into daily operations.

The findings indicate that continuous improvement in manufacturing does not inherently depend on complex or costly interventions. By addressing a fundamental mechanical constraint with a straightforward, reinforced bracket, researchers transformed process performance, validating the principle that simple solutions can yield substantial impacts. This case study reinforces the value of poka-yoke as a powerful tool for quality improvement, particularly when integrated with systematic problem-solving techniques such as the 5 Whys, and monitoring mechanisms, including operator checklists.

Beyond the immediate benefits, this study contributes to the broader discourse on Lean Manufacturing by illustrating how error-proofing strategies can effectively eliminate waste in the form of defects, downtime, and unnecessary operator interventions. The results emphasize that combining poka-yoke with Lean tools establishes a comprehensive framework for sustainable productivity and customer satisfaction.

This study enriches the existing literature in three significant ways:

- It provides empirical evidence of the effectiveness of poka-yoke in a heavy manufacturing context, a domain with limited prior research.
- It proposes a replicable framework for addressing mechanical deformation issues through error-proofing.
- It demonstrates how simple, low-cost interventions can align with sustainability and operational excellence objectives.

In conclusion, the successful application of this poka-yoke device substantiates the claim that well-designed physical interventions can lead to substantial improvements in industrial processes. This approach not only enhances product reliability but also

cultivates a culture of continuous improvement, offering a replicable model for other manufacturing contexts where mechanical limitations impede quality and efficiency.

## CONFLICTS OF INTEREST

The author declares no conflicts of interest.

## AUTHOR CONTRIBUTION

**Jesús Cruz Garza Moreno:** conceptualization, data curation, formal analysis, investigation, project administration, writing – original draft, writing – review and editing. **Luz Idalia Balderas García:** formal analysis, project administration, software, visualization, writing – original draft. **Yadira Aracely Fuentes Rubio:** conceptualization, investigation, visualization, writing – review and editing. **Azahel Treviño Villegas:** data curation, methodology, validation, and visualization. **Lourdes Yajaira García Rivera:** funding acquisition, resources, supervision, and validation.

## DECLARATION ON THE USE OF GENERATIVE IA

The authors used generative AI tools solely to improve the writing, grammar, and clarity of the manuscript. The interpretation of the results, analysis, and conclusions correspond exclusively to the authors.

## REFERENCES

- Alexander, P., Antony, J., & Rodgers, B. (2019). Lean Six Sigma for small-and medium-sized manufacturing enterprises: A systematic review. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 36(3), 378-397. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-03-2018-0074>
- Arroyo, O., Feliciano, D., Carrillo, J., & Hube, M. A. (2021). Seismic performance of mid-rise thin concrete wall buildings lightly reinforced with deformed bars or welded wire mesh. *Engineering Structures*, 241, 112455. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112455>
- Buer, S. V., Semini, M., Strandhagen, J. O., & Sgarbossa, F. (2020). The complementary effect of lean manufacturing and digitalization on operational performance. *International Journal of Production Research*, 59(7), 1976-1992. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1790684>
- Carrillo, J., Díaz, C., & Arteta, C. A. (2019). Tensile mechanical properties of the electro-welded wire meshes available in Bogotá, Colombia. *Construction and Building Materials*, 195, 352-362. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.096>

- Cerchione, R., & Esposito, E. (2016). A systematic review of supply chain knowledge management research: State of the art and research opportunities. *International Journal of Production Economics*, 182, 276-292. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.09.006>
- Cha, J., & Cho, B. R. (2014). Classical statistical inference extended to truncated populations for continuous process improvement: Test statistics, P values, and confidence intervals. *Quality and Reliability Engineering International*, 31(8), 1807-1824. <https://doi.org/10.1002/qre.1719>
- Chang, H. J., & Lee, M. C. (2017). Applying computer simulation to analyze the normal approximation of the binomial distribution. *Journal of Computers*, 28(5), 116-131.
- Chattopadhyay, A., Glinka, G., El-Zein, M., Qian, J. & Formas, R. (2011). Stress analysis and fatigue of welded structures. *Weld World*, 55, 2–21. <https://doi.org/10.1007/BF03321303>
- Cosme-Rodriguez, C., Macedo-Adrianzen, J., & Gutierrez-Falcon, P. C. (2025). Improving metal plate utilization through IoT-based poka yoke, AHP, and ergonomic design in an electrical transformer company. In *2025 IEEE XXXII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)* (pp. 1-7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INTERCON67304.2025.11244685>
- Dorota Rymaszewska, A. (2014). The challenges of lean manufacturing implementation in SMEs. *Benchmarking: An International Journal*, 21(6), 987-1002. <https://doi.org/10.1108/BIJ-10-2012-0065>
- Dudek-Burlikowska, M., & Szewieczek, D. (2009). The Poka-Yoke method as an improving quality tool of operations in the process. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 36(1), 95-102.
- Garza Moreno, J. C., Balderas García, L. I., & García Rivera, L. Y. (2024). Vandalism prevention and trash retention system improvement on Hidalgo County drainage district pump stations. In L. I. Balderas, S. Tiwari, E. Verdugo, G. P. Maestre-Gongora & F. Ortiz-Rodríguez (Eds.), *Exploring intersectionality and women in STEM* (pp. 151-168). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-1119-6.ch008>
- Gupta, S., Modgil, S., & Gunasekaran, A. (2019). Big data in lean six sigma: A review and further research directions. *International Journal of Production Research*, 58(3), 947-969. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1598599>
- Helo, P., Hao, Y., & Gunasekaran, A. (2025). Use of non-fungible tokens in operations and supply chain management. *International Journal of Production Research*, 63(14), 5099–5121. <https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2449588>

- Komkowski, T., Antony, J., Garza-Reyes, J. A., Tortorella, G. L., & Pongboonchai-Empl, T. (2023). A systematic review of the integration of Industry 4.0 with quality-related operational excellence methodologies. *Quality Management Journal*, 30(1), 3-15. <https://doi.org/10.1080/10686967.2022.2144783>
- Miranda-Giraldo, M., Gonzalez-Olier, C., Zambrano, H. R., & Arteta, C. A. (2024). Characterization of the microstructure and mechanical behavior of electro-welded wire meshes: A case study in Colombia. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02886. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02886>
- Quiroz Flores, J. C., Pianto Hora, L. G., & Trevejo Torres, A. L. (2023, July 19-21). Improvement model to reduce defective parts in the hinge line of a Peruvian metalworking SME using lean manufacturing tools. In *21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology* (p. 202). <https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.202>
- Rizos, S., Sfakianaki, E., & Kakouris, A. (2025). Unlocking lean potential in higher education: A systematic literature review and Delphi study. *International Journal of Lean Six Sigma* 17(4), 1099-1127. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-03-2025-0055>
- Saurin, T. A., Ribeiro, J. L. D., & Vidor, G. (2012). A framework for assessing poka-yoke devices. *Journal of manufacturing systems*, 31(3), 358-366. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.04.001>
- Wan Saidin, W. A. N., Mohd Idris, A. Z., Ravi, S., Ahmad Zaidi, A. M., & Kasim, N. I. (2015). Detection of Nut Welding Using Poka-Yoke Roller Coaster Jig. *Applied Mechanics and Materials*, 761, 170-174. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.761.170>

# MARCO ESTRATÉGICO-TÁCTICO INTEGRADO PARA EL DISEÑO DE CADENAS DE SUMINISTRO AGROALIMENTARIAS DE EXPORTACIÓN MEDIANTE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN MILP MULTIPERIODO

ERBERTH CRUZ PAREDES\*

<https://orcid.org/0009-0000-2313-937X>

Facultad de Ingeniería de Producción y Servicios,  
Universidad Nacional de San Agustín, Perú

Recibido: 7 de febrero del 2026 / Aceptado: 8 de abril del 2026

Publicado: 15 de junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8581>

**RESUMEN.** El diseño de cadenas de suministro agroalimentarias de exportación requiere integrar decisiones estratégicas y tácticas bajo condiciones productivas y comerciales variables. Este estudio propone un marco de optimización estratégico-táctico basado en un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) multiperiodo para el diseño de cadenas de suministro agroalimentarias que optimicen la inversión, instalaciones, abastecimiento y transporte en múltiples periodos. Además, se evalúa la robustez del modelo mediante el análisis de sensibilidad de parámetros clave. El enfoque se aplica a la industria de la pitahaya con un horizonte de diez años. El modelo determina una inversión inicial de S/ 680 186,9 y flujos de caja de S/ 769 007,3 anuales desde el sexto año. La configuración óptima incluye 8 almacenes modulares y 19 934 tutores de concreto. A su vez, se optimiza el transporte mediante una estrategia multimodal con costos de hasta S/ 206 180 anuales. Se demuestran mejoras en el desempeño económico y la configuración óptima de la cadena de suministro.

**PALABRAS CLAVE:** cadena de suministro / programación lineal entera mixta / modelo de optimización / planificación estratégica y táctica / agroalimentaria

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autor corresponsal

Correo electrónico: [ecruzp@unsa.edu.pe](mailto:ecruzp@unsa.edu.pe)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## INTEGRATED STRATEGIC-TACTICAL FRAMEWORK FOR THE DESIGN OF EXPORT AGRI-FOOD SUPPLY CHAINS USING A MULTI-PERIOD MILP OPTIMIZATION APPROACH

**ABSTRACT.** Designing export-oriented agri-food supply chains requires integrating strategic and tactical decisions under varying production and commercial conditions. This study proposes a strategic-tactical optimization framework based on a multi-period mixed-integer linear programming (MILP) model for designing agri-food supply chains to optimize investment, facilities, sourcing, and transportation over multiple periods. Furthermore, the model's robustness is evaluated through sensitivity analysis of key parameters. The approach is applied to the pitahaya industry over a ten-year horizon. The model determines an initial investment of S/ 680 186,9 and annual cash flows of S/ 769 007,3 starting in the sixth year. The optimal configuration includes eight modular warehouses and 19 934 concrete supports. Transportation is optimized through a multimodal strategy with annual costs of up to S/ 206 180, demonstrating improvements in economic performance and the optimal supply chain configuration.

**KEYWORDS:** supply chain / mixed-integer linear programming / optimization model / strategic and tactical planning / agri-food

## INTRODUCCIÓN

La dinámica del comercio internacional de productos orgánicos ha experimentado una aceleración significativa como resultado de cambios en los patrones de consumo global, pues gran parte de la población mundial se hizo más consciente de la importancia de una alimentación segura y saludable (Kumar et al., 2022). En este contexto, las preferencias alimentarias en todo el mundo se han diversificado debido a las transformaciones en los estilos de vida y el aumento demográfico, lo que ha reforzado el papel del sector agrícola como un componente clave en la economía global (Sufiyan et al., 2019).

A partir de ello, los procesos de la cadena de suministro adquieren una relevancia considerable en el comercio global y en los sectores económicos. En efecto, la cadena de suministro se configura como el elemento más importante de cualquier industria y representa el eje central de toda operación empresarial (Xu et al., 2024). Asimismo, la competencia entre las empresas se ha intensificado y se refleja actualmente en la necesidad de optimización de las cadenas de suministro, las cuales requieren mayores niveles de eficiencia (Liu & Lee, 2018). En consecuencia, la gestión óptima de la cadena de suministro es fundamental y determinante para lograr una producción más eficiente y minimizar costos operativos y logísticos (Gholian-Jouybari et al., 2023).

La cadena de suministro agroalimentaria constituye un sistema complejo caracterizado por la participación de múltiples eslabones en procesos diferenciados que funcionan de manera articulada para responder a una demanda global creciente (Mangla et al., 2018). En ese marco, dicho sistema integra, de manera compleja, las etapas de producción en granjas, procesamiento, almacenamiento, distribución y venta minorista al consumidor (Naik & Suresh, 2018). Asimismo, las cadenas de suministro agroalimentarias modernas cambian con el tiempo y evolucionan constantemente para responder a los desafíos dinámicos y complejos del entorno actual (Tsolakis et al., 2014).

Aunque tiene similitudes con las cadenas de suministro convencionales, la cadena de suministro agroalimentaria posee características únicas: un nivel elevado de complejidad que requiere habilidades de gestión especializadas (Onggo et al., 2019). Se distingue de las cadenas de suministro de manufactura o servicios por la naturaleza perecedera de los productos gestionados (Vazquez-Noguerol et al., 2022), la estacionalidad de la producción, y la variabilidad en la calidad y cantidad de la producción condicionada por factores climáticos, del suelo o humanos (Zhao et al., 2024).

Así, diversos factores como el cambio climático, los precios volátiles, la merma en los productos, la seguridad alimentaria y las políticas gubernamentales plantean desafíos constantes a las cadenas de suministro agroalimentaria (Ali et al., 2019). En ese sentido, un enfoque factible para reducir diversos desafíos propios de los sistemas agroalimentarios es la optimización del diseño y la planificación de la cadena de suministro. Los modelos

de optimización del diseño determinan la localización de instalaciones, su capacidad, estimación de costos y tiempos de operación, tecnologías a emplear, zonas de producción y procesamiento y selección de proveedores esenciales (Vieira et al., 2023). Según Martel y Klibi (2016), la complejidad de los modelos de optimización se debe a una variedad de factores: el alcance de las decisiones a tomar, la calidad de las proyecciones de costos e ingresos, los recursos potenciales múltiples, la cantidad y variedad de productos, las expectativas de los mercados, la complejidad de procesos productivos y logísticos, los objetivos a optimizar, las múltiples restricciones y la incertidumbre empresarial. Con todo ello, las decisiones estratégicas y tácticas en la gestión de la cadena de suministro agroalimentaria tienen influencia directa en la calidad final de los productos y en la rentabilidad económica de todo el sistema (Zhao et al., 2021).

En la toma de decisiones cuantitativas, la programación matemática cumple un rol importante, pues permite optimizar la asignación de recursos limitados según criterios de evaluación como costo, tiempo y beneficio. De este modo, facilita la obtención de soluciones óptimas para lograr actividades competitivas (Chandra & Grabis, 2016). Un problema de programación matemática consiste en minimizar o maximizar una función objetivo de variables reales o enteras sujeta a restricciones; los problemas de optimización se componen de tres elementos básicos: la función objetivo, conjunto de variables y conjunto de restricciones (Laínez-Aguirre & Puigjaner, 2015). Dentro de este campo, la programación lineal destaca por su practicidad. Esta es una técnica de optimización ampliamente utilizada en la agricultura, al brindar un soporte invaluable para tomar decisiones a través de modelos matemáticos efectivos y accesibles (Galán-Martín et al., 2015).

Según la literatura, el diseño de la cadena de suministro es una estrategia eficiente para brindar a las empresas visibilidad clara sobre el flujo de inventario, financiero y de información. Esta comprensión integral es la base para la toma de decisiones estratégicas y tácticas que optimizan el desempeño de la cadena de suministro. Las investigaciones demuestran que el problema del diseño de cadena de suministro ha sido estudiado en diversos marcos industriales y contextos. Hosseini-Motlagh et al. (2021) desarrollan un sólido modelo matemático para minimizar los costos totales de la cadena de suministro de trigo bajo incertidumbre integrando recolección, producción, inventario y distribución. El modelo desarrollado brinda perspectivas para tomar decisiones estratégicas y tácticas, las cuales están respaldadas por un análisis de sensibilidad.

En esa misma línea, Salehi-Amiri et al. (2021) estudiaron el diseño de la cadena de suministro para la industria de la nuez y desarrollaron un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) donde se minimizaron los costos integrando flujos directos e inversos para cumplir la demanda; asimismo, realizaron un análisis de sensibilidad de resultados. Clavijo-Burítica et al. (2023) proponen un diseño de cadena de suministro agroalimentaria resiliente a partir de desarrollar un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para

la minimización de costos. El modelo consideró el flujo de red hacia adelante y se validó con un caso de la industria cafetera colombiana. Finalmente, Rajabi-Kafshgar et al. (2023) diseñaron una cadena de suministro para el pistacho mediante programación lineal entera mixta (MILP) con el objetivo de minimizar los costos totales. Para ello, incorporaron la reutilización de residuos tanto en compost como en productos cosméticos.

A pesar de que los estudios mencionados destacan la relevancia del diseño de la cadena de suministro agroalimentaria, no abordan su aplicación en el cultivo de la pitahaya y operaciones poscosecha para exportación. De ese modo, los atributos distintivos de las frutas frescas para exportación, como su perecibilidad y los procesos de almacenamiento y transporte, representan desafíos que aún no han sido abordados en la literatura. Estos vacíos en investigaciones previas justifican el presente estudio, el cual busca desarrollar un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para el diseño de la cadena de suministro agroalimentaria de la pitahaya fresca para exportación.

Entre los años 2020 y 2024, Perú ha logrado diversificar y aumentar sustancialmente los envíos a mercados internacionales de agroproductos no tradicionales. Entre estos, sobresalen los arándanos, uvas, paltas y espárragos frescos, además de diversas frutas exóticas como la pitahaya. La pitahaya es una fruta exótica de color y forma muy atractivos; se presenta en diversos tipos, cuya diferencia más significativa es el color de su pulpa interna (Khatun et al., 2024). Tras un periodo de exportaciones mínimas, comprendido entre el año 2019 y 2022, las exportaciones de pitahaya peruana experimentaron un crecimiento exponencial a partir del 2023, cuando se registraron 101,4 toneladas valorizadas en US\$ 225 700. Esta cantidad se vio superada ampliamente en el año 2024, cuando se logró un hito al exportar 422 toneladas con un valor de US\$ 1,38 millones (Agroperú, 2025; Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2024).

En el contexto competitivo actual, el diseño de la cadena de suministro se presenta como una herramienta estratégica fundamental para que las empresas desarrollen una ventaja competitiva al permitirles tener operaciones con mayor grado de eficiencia y efectividad (Fathollahi-Fard et al., 2018). En consecuencia, el diseño de la cadena de suministro proporciona un marco de decisión basado en modelos matemáticos que otorgan una visión holística de la cadena de suministro y contribuye a las organizaciones para optimizar operaciones y afrontar retos de manera eficaz.

Como se mencionó, a pesar de los estudios realizados en el diseño de la cadena de suministro agroalimentaria en múltiples sectores y productos, se identifica una brecha de investigación sobre el diseño de cadenas de suministro de frutas exóticas de exportación, específicamente en la pitahaya, la cual requiere de la integración de eslabones y la planificación multiperiodo. De esta manera, este estudio plantea los siguientes objetivos de investigación:

- i) Desarrollar un marco de optimización estratégico-táctica integrada mediante un modelo MILP multiperiodo para el diseño de una cadena de suministro agroalimentaria de exportación orientado a la optimización del desempeño económico.
- ii) Analizar la sensibilidad de los parámetros productivos y comerciales para evaluar el impacto en el desempeño económico de la cadena de suministro de exportación.

Así, la presente investigación realiza aportes originales y contribuye significativamente tanto a la literatura académica como a las aplicaciones prácticas. En el ámbito académico, aborda la brecha entre los conocimientos teóricos ampliando la teoría de optimización en el contexto de la gestión de la cadena de suministro agroalimentaria para productos de exportación no tradicionales de alto valor como la pitahaya. Por otro lado, en las implementaciones prácticas, ofrece una guía para los profesionales gestores del sector y responsables de la toma de decisiones proporcionando una herramienta sólida para gestionar la cadena de suministro de pitahaya. Dicha herramienta orienta con la finalidad de maximizar los beneficios económicos en el mediano y largo plazo. Un aspecto distintivo de este modelo propuesto es la optimización de los flujos de caja anual en un horizonte de tiempo determinado.

Asimismo, el estudio proporciona un modelo MILP multiperiodo para el diseño integrado de la cadena de suministro de pitahaya, un cultivo cuya dinámica productiva y logística no ha sido formalmente modelada en la literatura. El modelo es novedoso porque incluye decisiones estratégicas y tácticas a la vez, así como parámetros logísticos y productivos propios del cultivo de la pitahaya, lo cual posibilita una representación práctica y realista para frutas exóticas emergentes en el Perú. Finalmente, la investigación se enfoca en el análisis detallado de la estructura de la red de cadena de suministro de pitahaya para exportación en un escenario real y el modelo se valida en la cadena de suministro de pitahaya de la zona agrícola del valle de Tambo, Arequipa.

## METODOLOGÍA

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo y aplicado. El caso de aplicación corresponde a una asociación de productores con 12 hectáreas destinadas a la producción de pitahaya. Los parámetros del modelo de programación lineal entera mixta (MILP) (costos, capacidad y niveles de producción) constituyen los datos de entrada del modelo. Las variables de decisión (flujos, cantidad de instalaciones y suministros) definen la configuración de la cadena de suministro y permiten optimizar los flujos de caja económico anuales. Este estudio está orientado al modelamiento matemático y diseño de la cadena de suministro de pitahaya para exportación mediante un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) multiperiodo. El modelo busca integrar decisiones estratégicas y tácticas

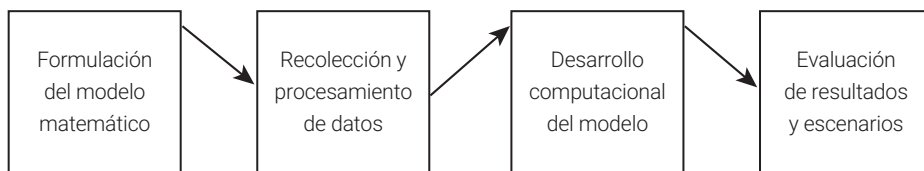
para maximizar el desempeño económico del sistema bajo restricciones de capacidad, demanda y disponibilidad.

Una cadena de suministro directa se conforma por proveedores, productores, centros de almacenamiento y acopiadores exportadores; a su vez, cuenta con flujos de producto, inventario y transporte establecidos en una perspectiva de planificación a diez años. La formulación del modelo busca maximizar el flujo de caja económico anual, expresado como la diferencia entre los ingresos por ventas y los costos totales de operación. Las restricciones del modelo abarcaron la capacidad de suministro, producción, almacenamiento, transporte y balances de flujo.

El modelo se implementó en Python y se ejecutó en la plataforma Google Colaboratory empleando librerías como PuLP y Pandas para la programación lineal entera mixta. La resolución se realizó mediante el *solver* CBC (COIN-OR Branch and Cut), el *solver* por defecto de PuLP. Con este se logró soluciones óptimas para cada periodo y proceso de la cadena de suministro. Para validar la robustez del modelo, se realizó un análisis de sensibilidad donde se examinó la variación de los resultados económicos frente a cambios de parámetros críticos productivos y comerciales. Este enfoque metodológico asegura que el estudio sea replicable y establece las bases para futuras ampliaciones del modelo hacia la sostenibilidad y circularidad de la cadena de suministro agroexportadora. La Figura 1 muestra las etapas de la investigación.

**Figura 1**

*Etapas de desarrollo de la investigación*

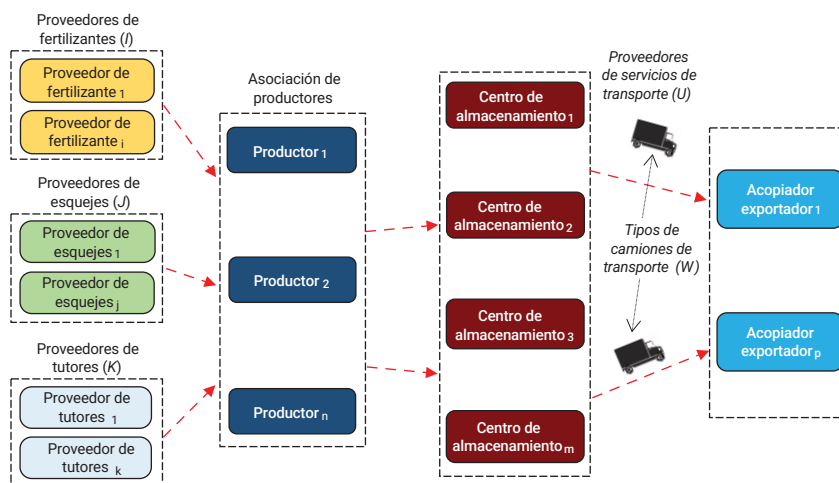


### **Formulación del modelo matemático de programación lineal**

En la Figura 2, se ilustra el diseño de una red de cadena de suministro multinivel para la pitahaya con fines de exportación, orientada a satisfacer las necesidades de los clientes acopiadores. El modelo propuesto considera el flujo de productos en sentido directo entre los diferentes niveles de la red.

**Figura 2**

Configuración de la cadena de suministro multinivel de pitahaya



Nota. Elaboración a partir de la propuesta de configuración óptima de la cadena de suministro. Los subíndices utilizados en cada componente de la cadena de suministro representan a  $i$  = proveedores de fertilizantes ( $i = 1, \dots, i$ ),  $j$  = proveedores de esquejes ( $J = 1, \dots, j$ ),  $k$  = proveedores de tutores ( $K = 1, \dots, k$ ),  $n$  = productores de la asociación ( $N = 1, \dots, n$ ),  $m$  = centros de almacenamiento ( $M = 1, \dots, m$ ),  $p$  = acopiadores exportadores ( $P = 1, \dots, p$ ).

### Notación de modelado

La definición de los componentes de la cadena de suministro en estudio se presenta en las tablas 1, 2 y 3.

**Tabla 1**

Conjuntos

Índice	Definición
T	Años del horizonte de planeamiento
I	Proveedores de fertilizantes
J	Proveedores de esquejes de pitahaya
K	Proveedores de tutores
U	Proveedores de transporte
W	Tipos de camiones de transporte

Nota. Los conjuntos se establecieron a través del mapeo de la red de suministro de pitahaya e identificación de actores y flujos de material relevantes. Entre ellos, los tutores son estructuras de postes de cemento o madera que brindan soporte físico para guiar el crecimiento de la pitahaya y sostener la planta en la etapa productiva de frutos.

**Tabla 2***Variables de decisión*

Variable	Definición
$YA_t$	1 si se instala un almacén en el periodo T, en caso contrario 0
$YSC_k$	1 si se selecciona los tutores del proveedor K, en caso contrario 0
$YR_k$	1 si los tutores comprados requieren renovación, en caso contrario 0
$QF_{it}$	Cantidad de fertilizante comprado del proveedor I en el periodo T (t)
$QE_j$	Cantidad de esquejes de pitahaya comprados del proveedor j (ud.)
$QT_k$	Cantidad de tutores adquiridos del proveedor K (ud.)
$QA_t$	Cantidad de centros de almacenamiento durante el periodo T (ud.)
$QPT_{uwt}$	Cantidad de pitahaya transportada por el proveedor U con el camión W en el periodo T (t)
$QV_{uwt}$	Cantidad de viajes por el proveedor U con el camión W en el periodo T (serv.)

**Tabla 3***Parámetros*

Parámetro	Definición
$CF_{it}$	Costo del fertilizante del proveedor I en el periodo T (S/ / t)
$CMF_{it}$	Capacidad máxima de suministro del proveedor I en el periodo T (t)
$CE_j$	Costo de esqueje de pitahaya del proveedor J en el periodo T (S/ / ud.)
$CME_j$	Capacidad máxima de suministro del proveedor j en el periodo T (ud.)
$CIT_k$	Costo por tutor inicial del proveedor K (S/ / ud.)
$CRT_k$	Costo de renovación de tutor del proveedor K (S/ / ud.)
$ICA_t$	Inversión en un centro de almacenamiento en el periodo T (S/)
$COA_t$	Costo de operación de un centro de almacenamiento en el periodo T (S/)
$CA_t$	Capacidad de almacenamiento de un almacén en el periodo T (t)
$CT_{ut}$	Costo de transporte por tonelada de la asociación de productores al acopiador exportador con el proveedor de transporte u en el periodo T (S/ / t)
$CC_{wut}$	Capacidad del camión tipo W del proveedor de transporte U en el periodo T (t)
$PP_t$	Producción proyectada de pitahaya en el periodo T (t)
PC	Cantidad de plantas de pitahaya cultivadas desde el inicio del horizonte de planificación (constante en el tiempo)
$CEP_t$	Calibre de exportación de pitahaya en el periodo T (%)
$CPU_t$	Costos productivos unitarios en el periodo T (S/ / ud.)
$PPE_t$	Precio de pitahaya de exportación en el periodo T (S/ / kg)
$RF_t$	Requerimiento de fertilizante por planta en el periodo T (kg / ud.)

### Función objetivo y restricciones del modelo matemático

La gestión eficiente de la cadena de suministro es decisiva para optimizar recursos limitados y reducir costos de producción y logísticos. Con ello, se garantiza la rentabilidad en un mercado competitivo. La función objetivo (FO) del modelo propuesto busca maximizar los flujos de caja económicos anuales y está representada por la ecuación 1.

$$\begin{aligned} \text{Maximizar } FCE_t = & \sum_{t \in T} PP_t CEP_t PPE_t - \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} QF_{it} CF_{it} - \sum_{t \in T} PC \cdot CPU_t - \\ & \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{w \in W} CT_{ut} QPT_{uwt} - \sum_{t \in T} ICA_t YA_t - \sum_{t \in T} COA_t QA_t - \sum_{j \in J} QE_j CE_j - \\ & \sum_{k \in K} CIT_k QT_k YSC_k - \sum_{k \in K} CRT_k QT_k YSC_k YR_k \end{aligned} \quad (1)$$

A fin de asegurar la claridad necesaria y articular de manera coherente el modelo matemático con la representación gráfica de la cadena de suministro de la Figura 2 y los conjuntos, variables de decisión y parámetros definidos en las tablas 1, 2 y 3, la ecuación 1 se desglosa en sus componentes fundamentales en la Tabla 4, donde se detalla la función de cada término.

**Tabla 4**

*Descripción detallada de los términos de la función objetivo*

Término matemático en la FO	Tipo de componente	Descripción detallada	Variables de decisión asociadas	Parámetros asociados
$\sum_{t \in T} PP_t CEP_t PPE_t$	Ingreso	Representa los ingresos por ventas generados en el periodo t. Se calcula como el producto de la producción proyectada (PP <sub>t</sub> ), porcentaje de calibre de exportación (CEP) y precio de venta (PPE <sub>t</sub> ).	-	PP <sub>t</sub> , CEP <sub>t</sub> , PPE <sub>t</sub>
$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} QF_{it} CF_{it}$	Costo operativo (OPEX)	Es el costo de adquisición de los fertilizantes. Corresponde al costo total de compra de fertilizante al proveedor i en el periodo t.	QF <sub>it</sub>	CF <sub>it</sub>
$\sum_{t \in T} PC \cdot CPU_t$	Costo operativo (OPEX)	Es el costo total asociado a las actividades agronómicas y de mantenimiento por planta cultivada (PC) en el periodo t.	-	PC <sub>t</sub> , CPU <sub>t</sub>
$\sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{w \in W} CT_{ut} QPT_{uwt}$	Costo logístico	Acumula el costo logístico de transportar la fruta (QPT <sub>uwt</sub> ) desde los productores hasta el acopiador exportador, utilizando el proveedor de transporte u y el tipo de camión w en el periodo t.	QPT <sub>uwt</sub>	CT <sub>ut</sub>

(continúa)

(continuación)

$\sum_{t \in T} ICA_t YA_t$	Costo de inversión (CAPEX)	Es el costo de inversión en habilitar nuevos centros de almacenamiento ( $YA_t$ ) en el periodo $t$ .	$YA_t$	$ICA_t$
$\sum_{t \in T} COA_t QA_t$	Costo operativo (OPEX)	Es el costo variable total de operar el centro de almacenamiento ( $QA_t$ ) en el periodo $t$ .	$QA_t$	$COA_t$
$\sum_{j \in J} QE_j CE_j$	Costo de inversión (CAPEX)	Es el costo total de adquisición de esquejes de pitahaya ( $QE_j$ ) al proveedor $j$ para la plantación del cultivo.	$QE_j$	$CE_j$
$\sum_{k \in K} CIT_k QT_k YSC_k$	Costo de inversión (CAPEX)	Es la inversión inicial en tutores, es decir, el costo de adquirir un nuevo sistema de tutores ( $QT_k$ ) del proveedor $k$ activado por la decisión de selección ( $YSC_k$ ).	$QT_k$ $YSC_k$	$CIT_k$
$\sum_{k \in K} CRT_k QT_k YSC_k YR_k$	Costo de inversión (CAPEX - recurrente)	Es el costo de renovación de tutores adicional incurrido cuando los tutores adquiridos requieren ser renovados, capturado por la interacción de las variables binarias de selección ( $YSC_k$ ) y renovación ( $YR_k$ ).	$QT_k YSC_k$ $YR_k$	$CRT_k$

Las restricciones que conforman el modelo de optimización se describen a continuación:

La ecuación 2 garantiza atender el requerimiento total por periodo de fertilizante orgánico para las plantas de pitahaya.

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} QF_{it} \cdot 1000 \geq PC \cdot RF_t \quad (2)$$

La restricción 3 establece la capacidad máxima de atención de los proveedores de fertilizantes para abastecer el requerimiento de fertilizante por periodo:

$$QF_{it} \leq CMF_{it} \forall i \in I; t \in T \quad (3)$$

El modelo considera una única compra de esquejes de pitahaya al inicio del horizonte de planificación (periodo  $t = 0$ ), la cual determina la cantidad de plantas (PC) que se establecerán y se mantendrán durante toda la vida útil del cultivo. Dado que durante la etapa de establecimiento inicial los esquejes de pitahaya presentan una tasa de mortalidad típica del 5 %, se incorpora un factor de seguridad. Por lo tanto, la ecuación 4 asegura que la cantidad total de esquejes comprados a los proveedores  $j$  sea suficiente para alcanzar la cantidad establecida de plantas, compensando las pérdidas esperadas.

$$\sum_{j \in J} QE_j \geq 1,05(PC) \quad (4)$$

La restricción 5 establece que la cantidad de esquejes a comprar será menor o igual a la capacidad de atención de los proveedores de esquejes.

$$QE_j \leq CME_j \quad \forall j \in J; t = 0 \quad (5)$$

La restricción representada por la ecuación 6 determina la elección de un solo proveedor de tutores. La ecuación 7 establece la relación entre los tutores y plantas de pitahaya. En el cultivo de pitahaya, cada planta requiere un tutor para su crecimiento y formación; un mismo tutor puede servir simultáneamente a dos plantas. Si se decide sembrar PC plantas de pitahaya, el número total de tutores requeridos es PC/2. Multiplicar por YSC<sub>k</sub> asegura que solo el proveedor elegido pueda tener compra positiva. Por otro lado, la ecuación 8 garantiza que la suma de tutores comprados a los proveedores sea exactamente igual al requerimiento total de tutores, lo que evita tanto el déficit como el excedente de tutores.

$$\sum_{k \in K} YSC_k = 1 \quad (6)$$

$$QT_k \leq \frac{PC}{2} \cdot YSC_k \quad \forall k \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} QT_k = \frac{PC}{2} \quad (8)$$

La restricción representada por la ecuación 9 garantiza la factibilidad logística del sistema al condicionar que el flujo de salida de pitahaya con calibre de exportación esté limitado por la capacidad de transporte, y definida por el número de viajes y la capacidad de los camiones.

$$QPT_{uwt} \leq CC_{wut} \cdot QV_{uwt} \quad (9)$$

En la restricción 10, al inicio del horizonte de planificación, no se tienen almacenes construidos previamente. La cantidad de almacenes en  $t = 1$  es igual a la decisión de instalación en ese periodo. Para los periodos siguientes, la cantidad de almacenes en el periodo  $t$  es igual a la cantidad del periodo anterior más las nuevas instalaciones. Con ello, se asegura que la capacidad disponible de almacenamiento sea suficiente para el periodo de producción determinado.

$$QA_1 = YA_1 \quad QA_t = QA_{t-1} + YA_t \quad \forall t \geq 2 \quad (10)$$

La ecuación 11 establece que la capacidad de almacenamiento debe ser igual o mayor a la producción anual de pitahaya con calibre de exportación.

$$CA_t \cdot QA_t \geq PP_t \cdot CEP_t \quad (11)$$

La ecuación 12 establece la condición para la instalación de un nuevo centro de almacenamiento. Esta inversión solo se materializa si la capacidad acumulada de almacenaje hasta el periodo anterior resulta insuficiente para almacenar la producción de pitahaya con calibre exportable del periodo actual. Se emplea una constante de valor suficientemente grande (M) para activar la restricción.

$$PP_t \cdot CEP_t - CA_t \cdot QA_t \leq M \cdot YA_t \quad \forall t \geq 2 \quad (12)$$

Finalmente, las ecuaciones 13 y 14 establecen el dominio para las variables de decisión entera y binaria.

$$QF_{it}, QE_j, QT_k, QA_t, QPT_{uwt}, QV_{uwt} \in Z \text{ positivos} \quad (13)$$

$$YA_t, YSC_k, YR_k \in \{0, 1\} \quad (14)$$

El modelo de cadena de suministro propuesto se basa en los supuestos que se enuncian a continuación: la suficiencia de la capacidad instalada, el uso de parámetros deterministas conocidos con antelación, la absorción total por parte de las acopiadoras exportadoras de la producción de pitahaya que satisface el calibre de exportación y la canalización de todos los envíos a través de centros de almacenamiento utilizando exclusivamente servicios de transporte especializado para productos perecibles.

**Recolección de datos para el estudio de caso**

La modelación evalúa el desempeño de la cadena de suministro de pitahaya facilitando la toma de decisiones estratégicas y tácticas. El modelo multiperiodo se aplicó para un horizonte de diez años por el ciclo productivo de la pitahaya, la que alcanza su rendimiento máximo entre el quinto y séptimo año. Esa información permitió evaluar inversiones estratégicas y maduración del cultivo a largo plazo. Para el caso de estudio, se consideró la frecuencia de cosecha de cuatro ciclos productivos durante los meses de diciembre a mayo de cada periodo. La recopilación de datos permitió parametrizar y validar el modelo de optimización de la cadena de suministro de pitahaya. Las tablas 5, 6 y 7 muestran la información de abastecimiento de esquejes, fertilizantes y sistema de conducción respectivamente.

**Tabla 5**

*Precios y oferta de esquejes de pitahaya*

Proveedor	Esqueje	Costo (S/ por ud.)	Capacidad de suministro (ud.)
Proveedor de esquejes 1	Sin raíz de 45 cm	2,00	20 000
Proveedor de esquejes 1	Con raíz de 45 cm	2,50	10 000

(continúa)

(continuación)

Proveedor	Esqueje	Costo (S/ por ud.)	Capacidad de suministro (ud.)
Proveedor de esquejes 2	Sin raíz de 45 cm	2,20	15 000
Proveedor de esquejes 2	Con raíz de 45 cm	3,00	8000
Proveedor de esquejes 3	Sin raíz de 50 cm	4,50	10 000

Nota. Con base en cotizaciones de proveedores nacionales.

**Tabla 6***Precios y oferta de fertilizante orgánico*

Proveedor	Fertilizante	Costo (S/ por t)	Capacidad de suministro (t)
RP	Compost de pollo	76,70	1725
RP	Compost de gallina	75,00	2640
SF	Compost de pollo	67,00	1150

Nota. Con base en datos de proveedores nacionales.

**Tabla 7***Costos y duración de tutores para el sistema de conducción*

Opción	Tutor	Costo (S/ por ud.)	Duración (años)
1	Concreto prefabricado	35,00	25-30
2	Concreto fabricado <i>in situ</i>	23,00	20-25
3	Eucalipto tratado	15,00	4-5

Nota. Con base en datos de proveedores locales y nacionales.

Sobre el almacenamiento, la conservación poscosecha es clave para cumplir con los estándares de calidad, el almacén modular refrigerado con energía fotovoltaica asegura la cadena de frío con una implementación rápida, menor inversión y fácil escalabilidad. En la Tabla 8, se detallan los parámetros de inversión, capacidad y costo operativo de un módulo de almacenamiento.

**Tabla 8***Costos y capacidad de un módulo de almacenamiento*

Parámetro	Unidad medida	Valor
Inversión	Soles	21 220,00
Capacidad de almacenamiento	Toneladas	12,00
Costo de operación anual	Soles	1400,00

Nota. Con base en el análisis técnico, los precios locales promedio y las condiciones operativas.

Los parámetros de transporte se detallan en la Tabla 9, obtenidos de empresas locales. Incluyen capacidad de unidades refrigeradas, costos por tonelada desde el valle de Tambo a Chíncha y frecuencia de viajes. Todo ello permite una representación coherente de los flujos del producto.

**Tabla 9**

*Costos, capacidades y disponibilidad de transporte*

Proveedor	Costo (S/ por t)	Capacidad de camión (t)	Disponibilidad
Empresa de transporte 1	540,00	17	3 veces por semana
Empresa de transporte 2	625,00	17	2 veces por semana
Empresa de transporte 3	480,00	8, 13 y 17	1 vez por semana
Empresa de transporte 4	565,00	17	1 vez por semana

*Nota.* Con base en información y cotización de proveedores locales y nacionales.

La producción anual total de pitahaya se proyecta considerando 12 hectáreas cultivadas con una densidad de 3164 plantas/ha. Para estimar la producción anual, se tiene en cuenta la capacidad de producción promedio de fruta por planta al año. La Tabla 10 detalla la proyección de producción promedio de pitahaya por año.

**Tabla 10**

*Producción promedio anual de fruta por planta de pitahaya en kilogramos*

Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
2,00	4,00	6,00	10,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00

*Nota.* Proyección basada en datos productivos de proyectos de cultivo anuales.

La pitahaya incrementa su rendimiento productivo anualmente y tiene una vida productiva de 15 años. De la producción total, el 80 % cumple con el calibre de exportación de 250 gr a 600 gr por fruto. Este porcentaje se fundamenta en información técnica proveniente de una empresa agroexportadora peruana que opera bajo condiciones similares a las del presente estudio. Por planta, entre el 78 % y 82 % de los frutos cosechados alcanzan el rango de peso con calibre de exportación; por lo tanto, se adopta un valor conservador del 80 % para la proyección de la producción total estimada para exportación por año detallada en la Tabla 11. Esta se calcula a partir de la producción promedio de fruta de pitahaya por planta al año (Tabla 10), el calibre de exportación y el área total cultivada.

**Tabla 11***Estimación anual de producción para exportación en toneladas*

Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
60,7	121,5	182,2	303,7	364,5	364,5	364,5	364,5	364,5	364,5

*Nota.* Proyección con base en rendimientos productivos, calibre de exportación y densidad de cultivo por ha.

La Tabla 12 muestra el requerimiento de fertilizante orgánico por planta durante el horizonte de planeamiento. A su vez, los costos unitarios de producción anual se presentan en la Tabla 13.

**Tabla 12***Requerimiento de fertilizante orgánico por planta (kg/planta/año)*

Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
4,00	4,00	6,00	8,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00

*Nota.* Cantidades basadas en experiencias nacionales.

**Tabla 13***Costos de producción unitarios (S//planta/año)*

Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
3,3	3,3	4,95	5,7	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05

*Nota.* Con base en datos primarios de costos de agua e insumos.

Los parámetros comerciales de precios de la pitahaya para exportación son esenciales para evaluar los flujos de caja económica del modelo de optimización de la cadena de suministro de pitahaya. La Tabla 14 muestra los precios de cada calibre de exportación de pitahaya.

**Tabla 14***Precios y porcentajes según calibre de exportación de pitahaya*

Calibre de exportación	% de la producción total	Precio promedio (S/ por kg)
250 gr-349 gr	30	2,16
350 gr-600 gr	50	4,32

*Nota.* Con base en fuentes primarias y precios promedio nacional.

## RESULTADOS

### Resultados del caso de estudio

La formulación de un modelo MILP permitió abordar simultáneamente la complejidad del diseño de la cadena de suministro integrando decisiones de nivel estratégico y táctico. A continuación, se presentan los resultados obtenidos al implementar el modelo de optimización propuesto en el estudio de caso. Las tablas 15, 16 y 17 presentan los resultados vinculados a la elección óptima de proveedores para los tres recursos estratégicos (esquejes, fertilizante y tutores) dentro de la cadena de suministro de pitahaya.

**Tabla 15**

*Resultados óptimos de compra de esquejes*

Proveedor	Esqueje	Cantidad (ud.)	Costo total (S/)
Proveedor esquejes 1	Sin raíz de 45 cm	20 000	40 000,00
Proveedor esquejes 1	Con raíz de 45 cm	4865	12 162,50
Proveedor esquejes 2	Sin raíz de 45 cm	15 000	33 000,00

*Nota.* Con base en los resultados del modelo de optimización, el costo total de adquisición de esquejes asciende a S/ 85 162,50 para las 12 ha de cultivo, se considera un 5 % de adicional.

**Tabla 16**

*Resultados óptimos de compra de fertilizante*

Año	Proveedor	Fertilizante	Cantidad (t)	Costo total (S/)
0	SF	Compost de pollo	152,00	11 248,00
1	SF	Compost de pollo	152,00	11 248,00
2	SF	Compost de pollo	228,00	16 872,00
3	SF	Compost de pollo	304,00	22 496,00
4-10	SF	Compost de pollo	342,00	25 308,00

*Nota.* Con base en los resultados del modelo de optimización.

**Tabla 17**

*Resultados óptimos de adquisición de tutores*

Opción	Tipo de tutor	Cantidad (ud.)	Costo total (S/)
1	Concreto prefabricado	0,00	0,00
2	Concreto fabricado <i>in situ</i>	19 934,00	458 482 00
3	Eucalipto tratado	0,00	0,00

*Nota.* Con base en resultados del modelo de optimización, se considera 5 % de adicional.

La Tabla 18 detalla los resultados óptimos del proceso de almacenamiento. El modelo determina una expansión progresiva de almacenes modulares: 4 de ellos en los primeros tres años, y 4 adicionales en el cuarto y quinto año. En total, fueron 8 almacenes modulares totales para cubrir la demanda en los diez años de horizonte de planeamiento.

**Tabla 18***Resultados óptimos de almacenamiento en soles*

Año	Cantidad de almacenes instalados	Inversión de instalación	Costo de operación anual	Costo total de almacenamiento
0	0	0,00	0,00	0,00
1	2	42 440,00	2800,00	45 240,00
2	1	21 220,00	4200,00	25 420,00
3	1	21 220,00	5600,00	26 820,00
4	3	63 660,00	9800,00	73 460,00
5	1	21 220,00	11 200,00	32 420,00
6-10	0	0,00	11 200,00	11 200,00

*Nota.* Con base en los resultados del modelo de optimización.

Los costos óptimos de transporte se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 19***Optimización de costos de transporte en soles*

Año	Costo total de transporte
1	32 640,00
2	69 360,00
3	106 080,00
4	167 760,00
5-10	206 180,00

*Nota.* Con base en los resultados del modelo de optimización.

Por otro lado, el plan de contratación de transporte óptimo se presenta en la Tabla 20.

**Tabla 20***Planificación óptima de contratación de transporte*

Año	Proveedor	Capacidad de camión (t)	Cantidad de viajes	Costo de transporte (S/)
1	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
2	Emp. Transp. 1	17,00	4	36 720,0

(continúa)

(continuación)

2	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
3	Emp. Transp. 1	17,00	8	73 440,0
3	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
4	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
4	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
4	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
5	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
5	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
5	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
5	Emp. Transp. 4	17,00	4	38 420,0
6	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
6	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
6	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
6	Emp. Transp. 4	17,00	4	38 420,0
7	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
7	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
7	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
7	Emp. Transp. 4	17,00	4	38 420,0
8	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
8	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
8	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
8	Emp. Transp. 4	17,00	4	38 420,0
9	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
9	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
9	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
9	Emp. Transp. 4	17,00	4	38 420,0
10	Emp. Transp. 1	17,00	12	110 160,0
10	Emp. Transp. 3	13,00	4	24 960,0
10	Emp. Transp. 3	17,00	4	32 640,0
10	Emp. Transp. 4	17,00	4	38 420,0

Nota. Con base en los resultados del modelo de optimización.

Los flujos de caja económicos óptimos se presentan en la Tabla 21 e integran los ingresos por ventas, costos operativos de producción, logísticos y ganancias. Esta proyección multianual ofrece una visión dinámica del desempeño económico de la cadena de suministro propuesta. Los flujos de caja anuales evidencian la eficiencia operativa de la cadena de suministro propuesta y su viabilidad a mediano y largo plazo, lo cual respalda decisiones sobre inversiones, adquisiciones, contratación logística y diseño de red con una base económica sólida.

**Tabla 21***Flujos de caja económicos óptimos en soles*

Año	Ingresos por ventas	Costos operativos	Inversión	Flujo de caja
0	0	136 542,4	543 644,5	-680 186,9
1	213 228,0	214 422,4	0,0	-1 194,4
2	426 456,6	299 593,6	0,0	126 863,0
3	639 684,9	371 813,6	0,0	267 871,3
4	1 066 141,4	534 202,4	0,0	531 939,0
5	1 279 369,7	531 582,4	0,0	747 787,3
6	1 279 369,7	510 362,4	0,0	769 007,3
7	1 279 369,7	510 362,4	0,0	769 007,3
8	1 279 369,7	510 362,4	0,0	769 007,3
9	1 279 369,7	510 362,4	0,0	769 007,3
10	1 279 369,7	510 362,4	0,0	769 007,3

*Nota.* Con base en los resultados del modelo de optimización.

### **Análisis de sensibilidad**

En esta sección, se realiza un análisis de sensibilidad sobre los parámetros del precio y rendimiento productivo para evaluar diversos escenarios y el comportamiento de los flujos de caja económicos en el horizonte de diez años. En la Tabla 22, se muestra que ambos parámetros presentan elasticidades mayores a 1,60 y se evidencian diferencias significativas en la variabilidad generada en el flujo de caja por cada variación de parámetro.

**Tabla 22***Sensibilidad del flujo de caja total ante variaciones del precio y rendimiento productivo*

Parámetro	Variación	Variación en el flujo de caja total	Elasticidad
Precio	-10 %	-20,71 %	2,07
Precio	-20 %	-41,43 %	2,07
Precio	-30 %	-62,14 %	2,07
Rendimiento	-10 %	-16,54 %	1,65
Rendimiento	-20 %	-34,47 %	1,72
Rendimiento	-30 %	-50,79 %	1,69

*Nota.* Elasticidad calculada como (% cambio en flujo de caja) / (% cambio en el parámetro). Valores > 1 indican sensibilidad alta.

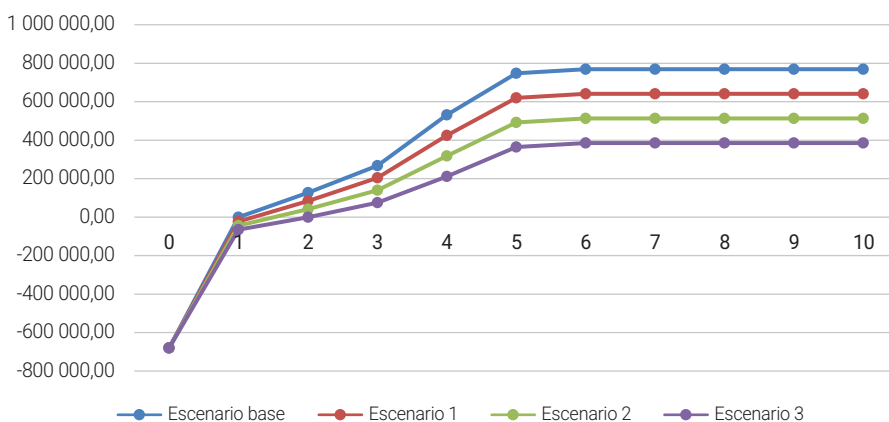
El análisis de sensibilidad revela diferencias significativas en la variabilidad generada por cada parámetro. El precio de venta presenta una elasticidad constante de 2,07. Ello indica que una disminución del 10 % en el precio reduce el flujo de caja total en 20,71 %, el cual es aproximadamente el doble de sensible que la variación del precio, relación lineal que se mantiene en todo el rango analizado de variación del 10 % al 30 %.

Por otro lado, el rendimiento productivo presenta una elasticidad promedio de 1,69, ligeramente menor que la del precio. Una reducción del 10 % en rendimiento genera una reducción del 16,54 % en el flujo de caja. Si bien esta sensibilidad sigue siendo alta, la variabilidad generada por el rendimiento es aproximadamente un 18 % menor que la inducida por el precio (elasticidades de 2,07 frente a 1,69). Esta comparación evidencia el principal aporte del análisis de sensibilidad: el precio constituye el parámetro crítico dominante en términos de variabilidad financiera, aunque el rendimiento productivo no puede ser desestimado.

La Figura 3 presenta la sensibilidad y el comportamiento del flujo de caja económico anual a lo largo del horizonte de planeamiento (diez años) bajo cuatro escenarios de precio de venta: base (sin reducción), y reducciones del 10 %, 20 % y 30 %. Se observa que, durante los primeros dos años (periodo de inversión inicial), todos los escenarios presentan flujos negativos similares, dado que la inversión de establecimiento del cultivo no depende del precio de venta. Sin embargo, a partir del tercer año, las curvas se separan progresivamente. La brecha entre escenarios se amplía año tras año debido al efecto acumulativo de los ingresos reducidos: a medida que se reduce el precio de venta de pitahaya, también disminuye el valor de la función objetivo. La Figura 3 muestra el impacto directo de la reducción del precio de venta en los flujos de caja anual.

**Figura 3**

*Cambios de flujo de caja por variación del precio de venta*

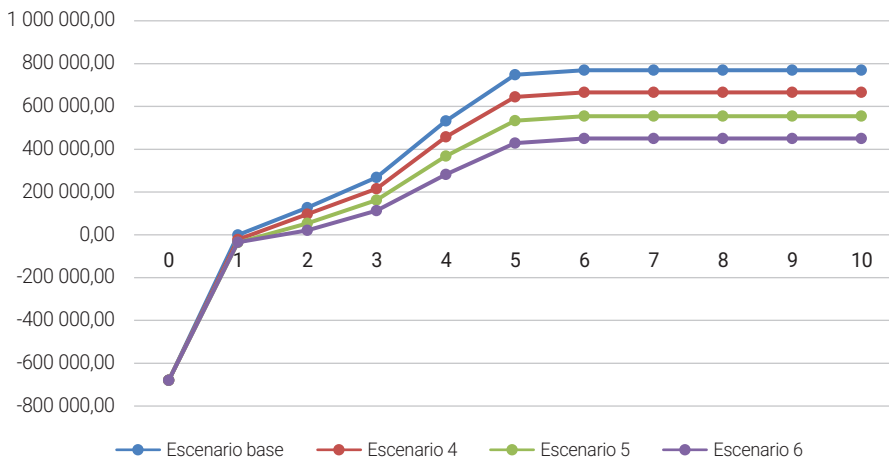


*Nota.* Resultados del modelo de optimización. El escenario 1 implica una reducción del precio de venta del 10 %; el escenario 2, una reducción del 20 %; y el escenario 3, una reducción del 30 %.

Por otro lado, la Figura 4 muestra la sensibilidad de la función objetivo a la reducción en el rendimiento productivo de las plantas de pitahaya. Se muestra la evolución anual del flujo de caja bajo tres escenarios de reducción del rendimiento productivo: 10 % (escenario 4), 20 % (escenario 5) y 30 % (escenario 6) en comparación con el escenario base. Al igual que en el caso del precio, los primeros años presentan flujos negativos similares entre escenarios, dado que la inversión inicial no depende del rendimiento. A partir del tercer año, las curvas de los flujos de caja económico se alejan, aunque con una separación menos pronunciada que en la Figura 3. Con ello, se identifica que la variación de los niveles de rendimiento productivo de la pitahaya tiene un efecto en los costos almacenamiento y transporte, y se asocia principalmente a factores como plagas, enfermedades y eventos climáticos extremos.

**Figura 4**

*Cambios de flujo de caja por variación del rendimiento productivo*



*Nota.* Resultados del modelo. El escenario 4 involucra una reducción del rendimiento productivo del 10 %; el escenario 5, una reducción del 20 %; y el escenario 6, una reducción del 30 %.

Las figuras 3 y 4 complementan el análisis cuantitativo de la Tabla 22 al mostrar la evolución temporal de los flujos de caja año a año. Mientras que la Tabla 22 resume el impacto total en el horizonte de diez años, las figuras 3 y 4 permiten identificar el momento en que divergen los escenarios (año 3), la magnitud de la brecha en cada periodo y el comportamiento acumulativo de las reducciones. Esta información temporal es relevante para la toma de decisiones sobre cuándo implementar estrategias de mitigación.

## DISCUSIÓN

En la investigación, se desarrolló y aplicó un modelo de programación lineal entera mixta multiperiodo para optimizar el diseño de una cadena de suministro de pitahaya para la

exportación. En esta sección, se presenta un análisis crítico de los resultados obtenidos, situando los hallazgos dentro de los antecedentes considerados para justificar las contribuciones únicas que aporta este trabajo. Los hallazgos muestran que el modelo propuesto tiene la capacidad de integrar dentro de un marco único decisiones estratégicas y tácticas que generan una cadena de suministro económicamente viable y eficiente operativamente. Esta investigación amplía el suministro al considerar tipos específicos de tutores y esquejes, lo cual es esencial para la rentabilidad en cultivos de gran valor.

En ese sentido, el modelo prioriza la diversificación y eficiencia en términos de costo al adquirir insumos y activos críticos para la producción. La solución para los esquejes combina estratégicamente las ofertas de dos proveedores y tres variedades de esquejes con el fin de minimizar el costo total de adquisición; ello reduce el riesgo operativo al garantizar el abastecimiento sin estar supeditado a una única fuente. Se observó que la producción exportadora de pitahaya necesita equilibrar costos, calidad y normativas; para ello, la fabricación local de tutores de concreto emerge como decisión estratégica clave. Con esta, el modelo prioriza el costo del ciclo de vida y minimiza gastos de reemplazo a diez años, de modo que se configura como un activo de larga duración.

Entre los resultados más destacados, se tiene el incremento de la capacidad de almacenamiento de manera gradual a través de la instalación de almacenes modulares con equipos de frío y energía fotovoltaica. Esta decisión estratégica mitiga la dependencia a operadores logísticos y reduce la inversión inicial. Para ello, el modelo sigue un plan de inversión progresivo alineado al crecimiento productivo que evita sobredimensionamiento inicial. A diferencia de modelos previos en productos no perecederos como trigo (Hosseini-Motlagh et al., 2021) o nuez (Salehi-Amiri et al., 2021), que utilizan infraestructura fija, el presente estudio incorpora modularidad dinámica enfatizando una ventaja clave del enfoque multiperiodo: la capacidad de adaptar la configuración de la cadena de suministro a los distintos niveles de producción que ocurren a lo largo del horizonte de planificación. Ello permite un diseño adaptable y actúa como mecanismo estratégico para estabilizar la calidad, reducir pérdidas poscosecha, disminuir la dependencia de operadores logísticos externos, y responde a un entorno agroexportador con variabilidad productiva creciente y mayores requerimientos logísticos.

En cuanto a la planificación del transporte, el modelo genera un plan de contratación óptimo combinando múltiples proveedores y capacidades vehiculares por periodo. Lo cual aventaja a enfoques que solo optimizan flujos agregados entre nodos. Este resultado evidencia que el modelo permite tomar decisiones tácticas de alto nivel considerando la realidad operativa en la que la capacidad de un solo proveedor puede ser insuficiente y la que sería difícil identificar mediante una planificación manual. Con ello, el modelo propuesto asegura la viabilidad de las operaciones logísticas.

Al respecto del flujo de caja proyectado, este es la verificación integral del diseño propuesto validando de manera económica las decisiones tomadas con flujos de caja estables y positivos a partir del segundo año. El flujo inicial es propio de inversiones significativas en infraestructura, activos e insumos. Su sensibilidad anual fue evaluada considerando fluctuaciones del 10 % al 30 % en rendimiento y precio de la pitahaya, lo cual disminuiría el flujo de caja anual. Sin embargo, la cadena de suministro demuestra viabilidad y resiliencia en el tiempo con flujos de caja positivos.

Finalmente, se identificó que la literatura actual es sólida, pero que se enfoca en productos con características logísticas y de valor diferentes a las frutas exóticas. En comparación con Hosseini-Motlagh et al. (2021) y Salehi-Amiri et al. (2021), cuyos modelos para el trigo y nuez, respectivamente, consideran flujos directos e inversos para productos con menor sensibilidad poscosecha, esta investigación se enfoca en optimizar la logística directa de la pitahaya, donde la viabilidad comercial del producto está supeditada a una logística óptima por la alta perecibilidad del producto. Por otro lado, el modelo de Clavijo-Buritica et al. (2023) para el café se centra en un flujo hacia adelante; en contraste, este estudio amplía el alcance al incluir decisiones multiperiodo y enfocar la dinámica real de cultivos como la pitahaya en contextos emergentes. Asimismo, mientras Rajabi-Kafshgar et al. (2023) se expande a la valorización de residuos del pistacho, el modelo aquí propuesto prioriza la eficiencia operativa al considerar en el diseño los detalles técnicos y logísticos de la pitahaya como fruta de exportación.

## CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo de programación lineal entera mixta multiperiodo para el diseño óptimo de la cadena de suministro de pitahaya para exportación de una zona agrícola del sur del Perú con condiciones específicas de clima y suelo. El modelo integra y sincroniza decisiones estratégicas y tácticas vinculando los procesos de abastecimiento, producción, almacenamiento y transporte, y seleccionando óptimamente proveedores de esquejes y fertilizante. Se determinó que fabricar tutores de concreto es lo más rentable en el largo plazo.

Las decisiones estratégicas incluyeron la instalación progresiva de almacenes, mientras que las decisiones tácticas optimizaron la planificación del transporte de pitahaya hacia los acopiadores exportadores, minimizando los costos totales. La solidez del flujo de caja respalda el diseño integrado y optimizado, de modo que es viable económicamente la producción para exportación de un producto de alto valor como la pitahaya.

Se ha identificado que la configuración óptima genera mayores beneficios económicos, lo cual fortalece la competitividad de los agricultores del valle de Tambo, Arequipa. Los resultados del modelo de optimización proporcionan una base técnica para decisiones

estratégicas y tácticas de los productores de pitahaya orgánica, lo cual establece una base sólida para el desarrollo competitivo del sector agrícola en el valle de Tambo, Arequipa.

Esta investigación sienta las bases para futuros estudios que fortalezcan la competitividad de la cadena de suministro agroalimentaria considerando la incorporación de incertidumbre mediante programación estocástica, la integración de criterios de sostenibilidad y la extensión del modelo para incluir logística inversa bajo principios de economía circular.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

El autor declara no tener conflictos de interés.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

**Erberth Cruz Paredes:** conceptualización, investigación, análisis formal, recursos, metodología, *software*, escritura: borrador original, escritura: revisión y edición, validación.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE IA GENERATIVA

No se ha utilizado IA generativa.

## REFERENCIAS

- Agroperú. (2025, 22 de enero). *Pitahaya peruana alcanzó récord de exportaciones en 2024*. <https://www.agroperu.pe/pitahaya-peruana-alcanzo-record-de-exportaciones-en-2024/>
- Ali, S. M., Moktadir, A., Kabir, G., Chakma, J., Rumi, J. U., & Islam, T. (2019). Framework for evaluating risks in food supply chain: implications in food wastage reduction. *Journal of Cleaner Production*, 228, 786-800. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.322>
- Chandra, C., & Grabis, J. (2016). *Supply Chain Configuration. Concepts, solutions, and applications* (2.ª ed.). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3557-4>
- Clavijo-Buritica, N., Triana-Sanchez, L., & Escobar, J. W. (2023). A hybrid modeling approach for resilient agri-supply network design in emerging countries: Colombian coffee supply chain. *Socio-Economic Planning Sciences*, 85, 101431. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101431>
- Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghahi-Keshteli, M., & Mirjalili, S. (2018). Multi-objective stochastic closed-loop supply chain network design with social considerations. *Applied Soft Computing*, 71, 505-525. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.07.025>

- Galán-Martín, A., Pozo, C., Guillén-Gosálbez, G., Vallejo, A. A., & Jiménez Esteller, L. (2015). Multi-stage linear programming model for optimizing cropping plan decisions under the new Common Agricultural Policy. *Land Use Policy*, 48, 515-524. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.06.022>
- Gholian-Jouybari, F., Hajiaghaei-Keshteli, M., Bavar, A., Bavar, A., & Mosallanezhad, B. (2023). A design of a circular closed-loop agri-food supply chain network - A case study of the soybean industry. *Journal of Industrial Information Integration*, 36, 100530. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100530>
- Hosseini-Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Abbasi Saadi, F. (2021) Strategic optimization of wheat supply chain network under uncertainty: a real case study. *Operational Research International Journal*, 21, 1487-1527. <https://doi.org/10.1007/s12351-019-00515-y>
- Khatun, T., Sharker Nirob, M. A., Bishshash, P., Akter, M., & Uddin, M. S. (2024). A comprehensive dragon fruit image dataset for detecting the maturity and quality grading of dragon fruit. *Data in Brief*, 52, 109936. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109936>
- Kumar, M., Raut, R. D., Sharma, M., Choubey, V. K., & Paul, S. K. (2022). Enablers for resilience and pandemic preparedness in food supply chain. *Operations Management Research*, 15, 1198-1223. <https://doi.org/10.1007/s12063-022-00272-w>
- Laínez-Aguirre, J. M., & Puigjaner, L. (2015). *Advances in integrated and sustainable supply chain planning*. Springer International Publishing.
- Liu, C. L., & Lee, M. Y. (2018). Integration, supply chain resilience, and service performance in third-party logistics providers. *The International Journal of Logistics Management*, 29(1), 5-21. <https://doi.org/10.1108/IJLM-11-2016-0283>
- Mangla, S. K., Luthra, S., Rich, N., Kumar, D., Rana, N. P., & Dwivedi, Y. K. (2018). Enablers to implement sustainable initiatives in agri-food supply chains. *International Journal of Production Economics*, 203, 379-393. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.012>
- Martel, A., & Klibi, W. (2016). *Designing value-creating supply chain networks*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28146-9>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2024). *Dinámica de la producción y precios de la pitahaya en el Perú, 2019 – 2024 (a julio)*. Dirección de Estudios Económicos – Dirección General de Políticas Agrarias. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/7087896/5543457-dinamica-de-la-produccion-y-precios-de-la-pitahaya-en-el-peru.pdf?v=1729086584>
- Naik, G., & Suresh, D. N. (2018). Challenges of creating sustainable agri-retail supply chains. *IIMB Management Review*, 30, 270-282. <https://doi.org/10.1016/j.iimb.2018.04.001>

- Onggo, B. S., Panadero, J., Corlu, C. G., & Juan, A. A. (2019). Agri-food supply chains with stochastic demands: a multi-period inventory routing problem with perishable products. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 97, 101970. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.101970>
- Rajabi-Kafshgar, A., Gholian-Jouybari, F., Seyedi, I., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2023). Utilizing hybrid metaheuristic approach to design an agricultural closed-loop supply chain network. *Expert Systems with Applications*, 217, 119504. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119504>
- Salehi-Amiri, A., Zahedi, A., Akbapour, N., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2021). Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110821>
- Sufiyan, M., Haleem, A., Khan, S., & Khan, M. I. (2019). Evaluating food supply chain performance using hybrid fuzzy MCDM technique. *Sustainable Production and Consumption*, 20, 40-57. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.03.004>
- Tsolakis, N. K., Keramydas, C. A., Toka, A. K., Aidonis, D. A., & Iakovou, E. T. (2014). Agrifood supply chain management: a comprehensive hierarchical decision-making framework and a critical taxonomy. *Biosystems Engineering*, 120, 47-64. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.10.014>
- Vazquez-Noguerol, M., Comesana-Benavides, J., Poler, R., & Prado-Prado, J. C. (2022). An optimisation approach for the e-grocery order picking and delivery problem. *Central European Journal of Operations Research*, 30, 961-990. <https://doi.org/10.1007/s10100-020-00710-9>
- Vieira, A. A. C., Figueira, J. R., & Fragoso, R. (2023). A multi-objective simulation-based decision support tool for wine supply chain design and risk management under sustainability goals. *Expert Systems with Applications*, 232, 120757. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120757>
- Xu, L., Mak, E., Proselkov, Y., & Brintrup, A. (2024). Towards autonomous supply chains: definition, characteristics, conceptual framework, and autonomy levels. *Journal of Industrial Information Integration*, 42, 100698. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100698>
- Zhao, G., Vázquez-Noguerol, M., Liu, S., & Parado-Prado, J. C. (2024). Agri-food supply chain resilience strategies for preparing, responding, recovering, and adapting in relation to unexpected crisis: a cross-country comparative analysis from the COVID-19 pandemic. *Journal of Business Logistics*, 45(1), e12361. <https://doi.org/10.1111/jbl.12361>
- Zhao, X., Wang, P., & Pal, R. (2021). The effects of agro-food supply chain integration on product quality and financial performance: evidence from Chinese agro-food processing business. *International Journal of Production Economics*, 231, 107832. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107832>

# OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE LÍNEAS DE PRODUCCIÓN MEDIANTE LA AUTOMATIZACIÓN DE CAPTURA DE DATOS Y SISTEMAS SCADA EN TIEMPO REAL

ALI JOSÉ CÉSPEDES VERA

<https://orcid.org/0009-0003-2478-7565>

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Experimental Politécnica  
"Antonio José de Sucre", Venezuela

Recibido: 20 de enero del 2026 / Aceptado: 31 de marzo del 2026

Publicado: 15 de junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8542>

**RESUMEN.** El estudio formuló un sistema integral de indicadores de producción y mantenimiento automatizados en tiempo real para optimizar la gestión en una planta de envasado de bebidas del sector de consumo masivo ubicada en Venezuela. La problemática radicaba en una gestión manual con debilidades administrativas y falta de datos confiables para la toma de decisiones. Bajo la modalidad de proyecto factible y diseño de campo, se aplicó un cuestionario a 41 trabajadores. Los resultados evidenciaron la necesidad de una solución tecnológica para el monitoreo instantáneo. La propuesta desarrollada e implementada demostró ser factible para incrementar la productividad de 44 % al 53 % y un índice de paradas de mantenimiento de 18 % a 10 %. El sistema integra métricas clave en una plataforma digital, lo que permite una respuesta inmediata ante desviaciones en las líneas de envasado. Se concluye que la automatización de indicadores es fundamental para alcanzar la excelencia operativa en entornos industriales.

**PALABRAS CLAVE:** indicadores de gestión / automatización / tiempo real / mantenimiento / líneas de producción / sistema SCADA

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autor corresponsal.

Correo electrónico: [alijosecespedes@gmail.com](mailto:alijosecespedes@gmail.com)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## OPTIMIZATION OF PRODUCTION LINE MANAGEMENT THROUGH DATA ACQUISITION AUTOMATION AND REAL-TIME SCADA SYSTEMS

**ABSTRACT.** The study formulated a comprehensive system of automated production and maintenance indicators in real time to optimize management in a beverage packaging plant in the mass consumption sector located in Venezuela. The problem lay in manual management with administrative weaknesses and lack of reliable data for decision making. Under the modality of feasible project and field design, a questionnaire was applied to 41 workers. The results showed the need for a technological solution for instant monitoring. The proposal, developed and implemented, proved to be feasible to increase productivity from 44 % to 53 % and a maintenance stoppage rate (from 18 % to 10 %). The system integrates key metrics into a digital platform, allowing an immediate response to deviations in packaging lines. It is concluded that the automation of indicators is essential to achieve operational excellence in industrial environments.

**KEYWORDS:** management indicators / automation / real-time / maintenance / production lines / scada system

## INTRODUCCIÓN

En el panorama industrial contemporáneo, la competitividad global está intrínsecamente ligada a la capacidad de las organizaciones para procesar información en tiempo real. La transición hacia la denominada Industria 4.0 ha dejado de ser una opción estratégica para convertirse en un requisito de supervivencia. Según datos del Foro Económico Mundial y McKinsey & Company (2023), las empresas que integran sistemas de monitoreo digital en sus líneas de producción logran incrementar su productividad hasta en un 22 % y reducir los costos de mantenimiento en un 30 %. En otras palabras, la transformación digital representa una oportunidad para revertir la baja productividad operativa (Pinzón Galán, 2019).

La relevancia de este problema radica en que el registro manual de datos es, por naturaleza, falible y tardío. Investigaciones recientes sobre la digitalización industrial, como la de Negri et al. (2020), sostienen que la integración de gemelos digitales (*digital twins*) con los sistemas de ejecución de manufactura (MES, por sus siglas en inglés) proporciona una estructura bidireccional que garantiza la sincronización entre la planta física y los modelos virtuales. Bajo este enfoque, la visualización en tiempo real deja de ser un recurso estático para convertirse en una herramienta dinámica de gestión, capaz de sustentar la toma de decisiones basada en el comportamiento predictivo de los activos industriales.

Esta falta de precisión y oportunidad en la captura de datos distorsiona los indicadores de gestión, lo que resulta crítico para una planta de envasado donde las líneas operan a altas velocidades superando a menudo las 40 000 unidades por hora. En este contexto, una demora de apenas 10 minutos en la detección de una desviación puede traducirse en pérdidas considerables por lucro cesante y mermas de materia prima. El control de las mermas es un factor crítico para la rentabilidad en el sector. Según Terry et al. (2020), el análisis sistemático de los procesos en la manufactura inteligente permite identificar puntos críticos de control donde la falta de monitoreo en tiempo real incrementa significativamente el uso ineficiente de recursos. La implementación de tecnologías de captura automática reduce la incertidumbre asociada a la gestión manual actuando como un factor determinante para la conservación de energía y la optimización operativa.

En la organización objeto de este estudio (una planta de envasado de bebidas ubicada en el estado Miranda, Venezuela), la problemática se manifiesta en una gestión de mantenimiento y producción que depende de procesos administrativos lentos. Actualmente, el cálculo de indicadores críticos como el tiempo medio entre fallas (inglés, *mean time between failures*, MTBF) se realiza de forma semanal, lo que impide una reacción inmediata ante desviaciones. Cifras preliminares del diagnóstico indican que la planta opera con un promedio del 42 % de productividad y un índice de parada de mantenimiento del 18 %, una cifra significativamente inferior al estándar de clase mundial que se sitúa por encima del 85 % (Nakajima, 1988). Esta brecha de 43 puntos porcentuales representa

una oportunidad de mejora masiva que solo puede ser abordada mediante la visibilidad técnica que proporcionan los sistemas jerárquicos de información.

En la planta estudiada, la falta de automatización oculta microparadas de menos de 2 minutos que, acumuladas en un turno de 12 horas, representan hasta un 18 % de la capacidad perdida. Respaldo estas afirmaciones con datos numéricos es fundamental. Estudios sectoriales indican que el costo por hora de inactividad en una línea de llenado de alta velocidad puede oscilar entre los 5000 y 15 000 dólares dependiendo de la complejidad del SKU producido (Moubay, 1997).

Por consiguiente, esta investigación propone la formulación de un sistema integral de indicadores jerárquicos y estratégicos automatizados en tiempo real mediante un sistema de monitoreo en la plataforma de Atvise. La investigación no solo busca resolver un vacío técnico en la planta, sino que pretende servir como modelo de referencia para otras industrias nacionales que enfrentan obsolescencia administrativa. Para ello, la selección de métricas jerárquicas se fundamenta en los criterios de escalas e indicadores propuestos por Silva (2016).

La presente investigación aborda la brecha tecnológica en la gestión de líneas de envasado, donde la dependencia de registros manuales compromete la integridad de los datos. El objetivo central es diseñar un sistema de indicadores estratégicos bajo el paradigma de la Industria 4.0, que permita una transición de una cultura reactiva a una proactiva. A diferencia de estudios previos que se centran en la automatización aislada, esta propuesta integra métricas de producción y mantenimiento en una plataforma SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos). Se trata de una arquitectura de *software* industrial diseñada para la gestión integral de procesos, unificada para optimizar la toma de decisiones en tiempo real.

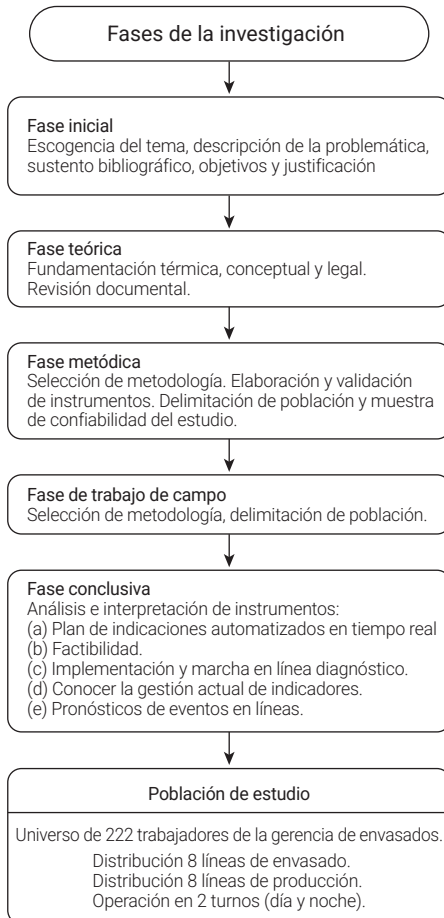
La visualización de datos en tiempo real mediante *dashboards* es fundamental para la supervisión remota. De acuerdo con Allen et al. (2021), la integración de interfaces digitales en la planta permite reducir la carga cognitiva de los operadores y facilita una respuesta operativa inmediata; esto mejora la eficiencia general al mitigar la brecha de información entre los niveles técnicos y los de supervisión.

## METODOLOGÍA

La investigación se tipificó como un proyecto factible con diseño de campo. Según Palella Stracuzzi y Martins Pestana (2012), esta modalidad consiste en elaborar una propuesta viable para atender necesidades específicas a partir de un diagnóstico. El estudio se estructuró en fases: diagnóstico, factibilidad, diseño, implementación y evaluación. Para la realización de la investigación, se desarrolló la siguiente serie de fases:

**Figura 1**

*Fases de la investigación*



**Población y muestra**

La población estuvo conformada por 222 trabajadores de la Gerencia de envasado, distribuidos en ocho líneas de producción (Tabla 1). Se aplicó un muestreo no probabilístico intencional (Hernández Sampieri et al., 2010), seleccionando como muestra a 41 personas de la Línea 3 (Retornable 1,25 L), por ser el área crítica para la investigación (Tabla 2).

**Tabla 1**

*Población del objeto de estudio*

Descripción	Total
Línea 3: retornable, formato 1,25 L	41
Línea 4: lata, formato 350 mL	27
Línea 5: PET, formatos múltiples, 500 mL y 1 L	22
Línea 6: PET, formato 2 L	27
Línea 24: PET llenado en caliente, formato 1,5 L	24
Línea 23-7: BIB, formato bolsa para dispensador, formatos 3,75 L y 8 L	27
Línea 25: PET, llenado en caliente, formato 500 mL	27
Línea 32: Cartón, formato 250 mL	27
Total	222

*Nota.* L = litro. Esta tabla se elaboró a partir de los datos del inventario de las líneas de producción en formatos de envasado en la empresa embotelladora.

**Tabla 2**

*Muestra (Línea 3: retornable, formato 1,25)*

Descripción	Total
Gerente de envasado	01
Especialista de mantenimiento I	01
Superintendente de producción	01
Supervisor de producción	02
Analistas de calidad	02
Mecánicos	02
Electricistas	02
Operadores (nómina diaria)	30
Total	41

*Nota.* Datos obtenidos de la estructura de cargos y requerimientos de la nómina del personal del área de envasado del 2023.

### Técnica e instrumento

Se empleó la encuesta mediante un cuestionario de 25 ítems con escala tipo Likert (5 a 1). La validez de contenido se obtuvo mediante el juicio de tres expertos (gerente de planta, especialista de mantenimiento II y superintendente de automatización). La confiabilidad se determinó mediante el coeficiente alfa de Cronbach procesado en el *software* IBM SPSS Statistics v. 24.

Para la recolección de datos, se seleccionó una muestra censal de 41 trabajadores directamente vinculados a la línea de envasado. El tipo de muestreo fue no probabilístico

intencional, justificado por la necesidad de obtener información de sujetos con conocimiento técnico específico sobre las paradas de mantenimiento y los tiempos de ciclo. La confiabilidad del instrumento se validó mediante el coeficiente alfa de Cronbach, de donde se obtuvo un valor de 0,87, lo que indica una consistencia interna alta y apta para fines de investigación científica.

El procesamiento de datos se realizó mediante el *software* estadístico, JASP / SPSS / Excel, aplicando pruebas de tendencia central y estadística inferencial (prueba t de Student y correlación de Pearson)

**Tabla 3**

*Coefficiente alfa de Cronbach*

Rango	Confiabilidad (dimensión)
0,81 a 1,00	Muy alta
0,61 a 0,80	Alta
0,41 a 0,60	Media
0,21 a 0,40	Baja
0,01 a 0,20	Muy baja

*Nota.* Adaptado de *Instrumentos y técnicas de investigación educativa*, por C. J. Ruiz Bolívar, 2013, p. 65, DANAGA Training and Consulting.

## Variables

Partiendo del objetivo general de esta investigación, se extrajeron las variables del estudio, las cuales fueron elaboradas para ser estudiadas detalladamente con la finalidad de obtener información necesaria para el desarrollo del siguiente trabajo. Dada la complejidad del sistema implementado, la operacionalización de las variables se ha estructurado en dos dimensiones fundamentales: la estratégica, orientada a la toma de decisiones gerenciales (Tabla 4), y la operativa, enfocada en los parámetros técnicos de producción (Tabla 5).

**Tabla 4**

*Operacionalización de variables: dimensiones estratégicas*

Variable	Dimensión	Indicadores
Sistema de indicadores de producción y mantenimiento	Gestión estratégica en tiempo real	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alineación con objetivos estratégicos</li> <li>• Cumplimiento de metas globales</li> <li>• Operativa</li> <li>• Técnica</li> <li>• Económica</li> </ul>

*Nota.* Esta tabla se enfoca en la efectividad, la direccionalidad del negocio y la capacidad de respuesta gerencial para la toma de decisiones.

**Tabla 5***Operacionalización de variables: dimensiones operativas*

Variable	Dimensión	Indicadores
Gestión de líneas de producción	Gestión operativa en tiempo real	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toma de decisiones inmediata</li> <li>• Visualización remota de indicadores, soporte externo (<i>dashboards</i>)</li> <li>• Desviaciones de calidad en proceso</li> <li>• Eficiencia de los equipos en tiempo real</li> <li>• Productividad en tiempo real</li> <li>• Reducción del índice de paradas de mantenimiento en tiempo real</li> <li>• Pronóstico de volumen de cajas en tiempo real</li> </ul>

*Nota.* Definición de variables estratégicas y operativas para el sistema integral de indicadores de la planta de envasado.

Los datos se tabularon y codificaron en SPSS v. 24. Se utilizó el análisis cuantitativo descriptivo, que representa los hallazgos en tablas de frecuencia, y gráficos circulares para contrastar la gestión manual frente a la propuesta automatizada.

El análisis de los datos se realizó mediante estadística descriptiva e inferencial. Para validar la efectividad de la automatización, se empleó la prueba t de Student para muestras relacionadas asumiendo un nivel de confianza del 95 % ( $\alpha = 0,05$ ). Asimismo, se calcularon los intervalos de confianza (IC) para las medias de productividad, lo que permitió determinar el rango de variabilidad del rendimiento operativo bajo el nuevo sistema SCADA.

1. Validación de confiabilidad. El procesamiento arrojó un valor de 0,87, lo que, según el baremo de Palella Stracuzzi y Martins Pestana (2012), indica una confiabilidad alta, validando la consistencia del instrumento para medir las deficiencias del sistema actual.
2. Diagnóstico de la gestión actual. Se detectó una brecha crítica de información: el 80 % de la muestra afirmó que el registro manual genera retrasos que impiden correcciones inmediatas. Esta latencia de respuesta se cuantificó en 168 horas (ciclo semanal), lo que contamina la base de datos estratégica debido a desviaciones en los reportes de paradas.
3. Implementación del sistema SCADA. La transición al monitoreo automatizado permitió centralizar datos directamente desde los controladores lógicos programables (PLC, como Allen Bradley y Siemens) y reducir el margen de error humano en un 95 %. El sistema permite visualizar en tiempo real indicadores como
  - Eficiencia de equipos y productividad
  - Pérdidas de botellas y tiempos operativos (TR)
  - Cuellos de botella (equipo más improductivo)

## RESULTADOS

La implementación del sistema SCADA se llevó a cabo a través de la integración de los PLC de la familia Allen Bradley (Control Logix) con el *software* Atvise, los cuales fueron comunicados mediante protocolos industriales, red Ethernet para la extracción de datos en tiempo real de la línea de producción. El proceso se ejecutó en tres fases técnicas: primero, la configuración de los nodos de comunicación y el mapeo de variables (*tags*) de producción y mantenimiento; segundo, el desarrollo de la interfaz hombre-máquina (HMI) para la visualización jerárquica de los indicadores; y tercero, la migración de los registros manuales a una base de datos digital automatizada. Esta arquitectura permitió capturar eventos de parada de línea de forma instantánea, lo que logró una reducción del error humano en la captura de datos del 95 % y eliminó las discrepancias entre los reportes de turno y la realidad física de la producción. Todo ello garantiza la integridad de la información según la metodología de desarrollo de sistemas de Senn (2005).

Los resultados del cuestionario aplicado a los 41 trabajadores evidenciaron que el registro manual no solo era lento, sino propenso a errores de transcripción que distorsionaban la realidad productiva. Al implementar el sistema SCADA y la visualización en tiempo real, se observó una transformación en la cultura organizacional. Según lo planteado por Senn (2005) en su metodología de desarrollo de sistemas, la integridad de los datos es el pilar de cualquier sistema de control. En este estudio, la automatización permitió reducir el margen de error humano en la captura de paradas de línea en un porcentaje del 95 %, alineándose con las tendencias de manufactura inteligente propuestas por Groover (2019). Ello permitió incrementar la productividad de 45 % a 53 % y bajar el índice de paradas asociadas a mantenimiento de 18 % a 10 %.

Al aplicar la prueba de significancia, se obtuvo un valor  $t = 3,42$  ( $p = 0,012$ ). Dado que el  $p$ -valor es inferior a 0,05, se confirma que el incremento en la productividad es estadísticamente significativo. El análisis de intervalo de confianza al 95 % para la media de productividad posimplementación se situó entre 51,2 % y 54,8 %, lo que asegura que los niveles alcanzados son consistentes y superiores al promedio histórico manual del 44 %.

En cuanto al índice de paradas de mantenimiento (IPM), el cálculo del intervalo de confianza para la reducción de tiempos muertos mostró un rango de 9,1 % a 10,9 %, validando la estabilidad de la mejora. La correlación de Pearson ( $r = -0,78$ ) reforzó este hallazgo, pues indicó que la disponibilidad de datos en tiempo real tiene una incidencia directa y significativa en la disminución de las interrupciones técnicas.

**Tabla 6**

*Pruebas de significancia e intervalos de confianza para variables operativas*

Variable	Estadístico (t)	Sig. (p)	IC 95 % Lím. Inf.	IC 95 % Lím. Sup.
Productividad general	3,42	0,012	51,2 %	54,8 %
Eficiencia de mantenimiento	2,89	0,024	9,1 %	10,9 %

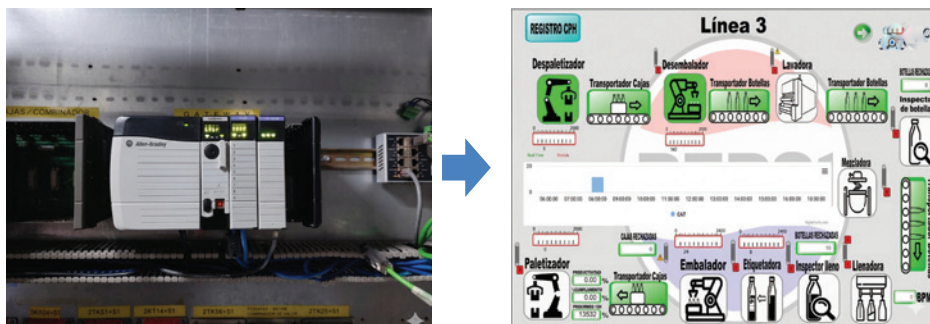
*Nota.* N = 41. El nivel de significancia se estableció en  $p < 0,05$ . IC = intervalo de confianza. Descripción del sistema de monitoreo.

La línea 3 es la primera línea donde se llevó a cabo la instalación del sistema automático de monitoreo de las variables de producción y mantenimiento. Esta línea está constituida por doce PLC: ocho de estos son PLC 5; dos, SLC 504; y dos, Contrologix, de nueva generación, instalación de proyecto reciente, todos de la marca Allen Bradley. Es de destacar que, en relación a estos últimos, constituye una actualización que recibió la línea de producción, no forma parte del proyecto en sí, pero se menciona, ya que en conjunto hacen la totalidad de los equipos. La red de comunicación entre ellos es comunicación data Highway Plus; para la adquisición de los datos, fue necesario realizar la instalación de un PLC Contrologix 1756-L71, en el chasis del *gateway* ya existente. Este PLC se configuró y programó para ser el concentrador de todas las variables que se van leer y escribir desde y hacia el sistema SCADA.

En la Figura 2, se puede observar el PLC, en el cual convergen todas las señales de los equipos y luego la información es transferida al sistema de monitoreo vía red Ethernet. El sistema se encuentra ubicado en las instalaciones de la planta de envasado, específicamente en la línea 3 del sistema de control industrial para la visualización de procesos, cuyo *layout* presenta una configuración en forma de herradura en la línea de producción (despaletizador, lavadora, llenadora, entre otros).

**Figura 2**

*Pantalla de visualización en tiempo real SCADA*

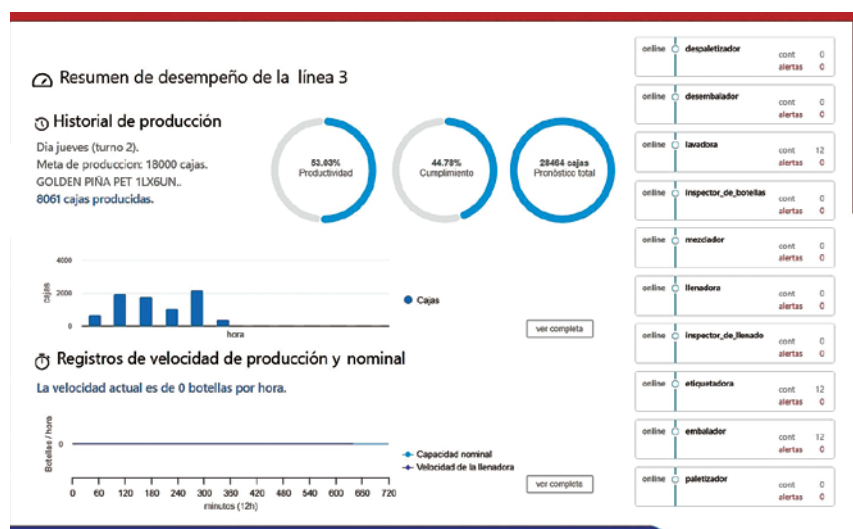


*Nota.* Representación del PLC como nodo central donde convergen las señales de los equipos periféricos, integrado con la interfaz del sistema SCADA para la visualización de datos.

En la Figura 3, se detalla la velocidad de la llenadora, las paradas, el pronóstico, el volumen envasado, la productividad, las averías, el equipo más improductivo, la calidad y la disponibilidad en tiempo real. El sistema integra el monitoreo en tiempo real de métricas críticas como cajas producidas, velocidad de llenadora y tiempos operativos (TR), visualizando de forma simultánea cuatro indicadores clave de mantenimiento y producción.

**Figura 3**

*Pantalla representativa de las variables de control*



*Nota.* La interfaz muestra la representación de la velocidad de la llenadora, el registro de paradas, el pronóstico de producción, el volumen envasado y la productividad.

**Tabla 7**

*Tabla de productividad línea 3 (marzo 2023-enero 2024)*

			Productividad de línea	Productividad objetivo
Centro	Año natural/mes		%	%
RP02	Planta objeto de estudio	MAR 2023	39,92	45,00
RP02	Planta objeto de estudio	ABR 2023	40,40	45,00
RP02	Planta objeto de estudio	MAY 2023	43,68	45,00
RP02	Planta objeto de estudio	JUN 2023	44,05	45,00
RP02	Planta objeto de estudio	JUL 2023	38,79	45,00
RP02	Planta objeto de estudio	AGO 2023	44,97	45,00

(continúa)

(continuación)

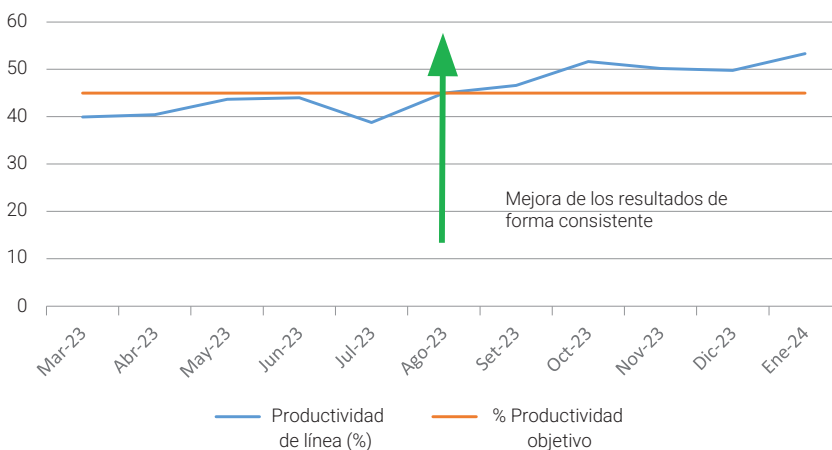
			Productividad de línea	Productividad objetivo
Centro	Año natural/mes		%	%
RP02	Planta objeto de estudio	SEP 2023	46,59	45,00
RP02	Planta objeto de estudio	OCT 2023	51,66	45,00
RP02	Planta objeto de estudio	NOV 2023	50,21	45,00
RP02	Planta objeto de estudio	DIC 2023	49,78	45,00
RP02	Planta objeto de estudio	ENE 2024	53,33	45,00

Nota. Datos obtenidos de la planta objeto de estudio durante el periodo marzo 2023-enero 2024.

En el cuadro anterior, se puede observar la productividad de la línea y el porcentaje objetivo; en este caso, se inició el registro del periodo en marzo del 2023, donde la productividad de la línea no cumplió con el objetivo, ubicándose en un 39,92 %. En abril, subió un 0,48 % para un 40,40 %; en mayo se elevó a 43,68 %; y en junio, a 44,05 %. Aun así, no se llegaba a cumplir con la meta. En agosto, se implementó el sistema en etapa de prueba, se registraron los procesos y se hizo el cambio de la antigua gestión a la automatizada. A partir de octubre del 2023 hasta el mes en curso (enero del 2024), el sistema de indicadores automatizados a tiempo real ha permitido cumplir el porcentaje objetivo e incluso superarlo, tal como se observa en la Figura 4 que se presenta a continuación:

**Figura 4**

Indicador de productividad luego de la implementación el sistema, (periodo de marzo-enero del 2024)



Por lo tanto, se pudo registrar una mejora considerable y consistente en los resultados obtenidos con referencia a la productividad, pues subió de 44 % a 53 %.

Para validar la significancia estadística de la mejora observada en la Tabla 8, se aplicó una prueba t de Student para muestras relacionadas comparando la productividad media antes (44 %) y después (53 %) de la intervención. El análisis arrojó un valor  $t = 3,42$  con un p-valor de 0,012 ( $p < 0,05$ ), lo que lleva a rechazar la hipótesis nula y confirmar que el incremento es estadísticamente significativo. Asimismo, el cálculo del intervalo de confianza al 95 % para la productividad posimplementación se situó entre 51,2 % y 54,8 %, lo que demostró que los resultados son consistentes y no obedecen a fluctuaciones aleatorias del proceso manual previo.

**Tabla 8**

*Resumen de pruebas estadísticas de significancia y correlación*

Variable de análisis	Prueba estadística	Valor del estadístico	Nivel de significancia (p)	Interpretación
Productividad (antes vs. después)	Prueba t de Student para muestras relacionadas	$t = 3,42$	0,012	Significativa ( $p < 0,05$ )
Latencia de datos vs. IPM	Correlación de Pearson (r)	$r = -0,78$	0,004	Correlación negativa

*Nota.* IPM = índice de paradas de mantenimiento. Los datos reflejan una mejora del 9 % en la productividad y una reducción del 8 % en las paradas tras la automatización de la captura de datos ( $N = 41$ ).

La respuesta a tiempo real del sistema implementado produce una respuesta correcta en un espacio definido de tiempo. De este modo, si la respuesta del sistema excede ese espacio de tiempo, entonces se obtendrá una degradación del desempeño o un mal funcionamiento; es ahí donde el personal que gestiona la línea de producción puede atender en ese preciso momento lo sucedido. Esto ha permitido que las operaciones fluyan correctamente, pues a través de este se realizan tareas para la adquisición, validación, filtraje y escalado de los procesos, las mismas son periódicas y ejecutadas de acuerdo con su prioridad. Estas tareas brindan resultados de las mediciones y estados, y permiten saber si la información recibida es válida.

La discusión se centra en cómo la eliminación de la transcripción manual de datos redujo el error humano en un 95 % y permitió una mejora del 9 % en la tasa de productividad pasando de 44 % a 53 %. Según Rusch (2018), el incremento en el cumplimiento de metas alcanzado en la planta demuestra que la automatización conduce hacia la excelencia operativa, que finalmente es el objetivo primordial.

La evaluación posimplementación indicó que el sistema redujo significativamente el tiempo transcurrido entre la ocurrencia de una falla y la ejecución de la acción correctiva,

lo que mejoró la disponibilidad de la línea y, con él, la reducción del índice de parada de mantenimiento de 18 % a 10 %.

Asimismo, se realizó un análisis de correlación de Pearson para determinar la relación entre la reducción de la latencia informativa y el IPM. Se obtuvo un coeficiente de correlación de  $r = -0,78$ , lo que indica una correlación negativa fuerte y significativa. Este resultado demuestra que, a medida que aumenta la disponibilidad de datos instantáneos mediante el sistema SCADA, disminuye proporcionalmente el tiempo de respuesta ante fallas técnicas, lo que optimiza el ciclo de vida de los activos.

La implementación del modelo de indicadores en tiempo real representa un salto cualitativo frente a la gestión tradicional observada en la planta.

## DISCUSIÓN

Tras la implementación del sistema SCADA y la automatización de la captura de datos, se realizó un seguimiento exhaustivo durante agosto. Los datos arrojan una mejora significativa en los indicadores clave de desempeño (KPI). La productividad operativa ascendió del 44 % al 53 %, lo cual representa un incremento neto del 9 % en la eficiencia de la línea de envasado. Antes de la propuesta, el IPM se situaba en un 18 %, debido principalmente a la demora en la detección de microparadas y la falta de registro de tiempos ciegos. Con la supervisión en tiempo real, el IPM se redujo al 10 %, lo que permitió una disponibilidad mecánica superior y una respuesta inmediata del equipo técnico ante cualquier desviación detectada por los sensores.

La mejora del 9 % en productividad es atribuible directamente a la eliminación de los tiempos ciegos y la capacidad de intervención inmediata, validada por la estabilidad de los datos tras la fase de prueba en agosto.

La implementación del sistema de control y monitoreo en tiempo real permitió una mejora significativa en la eficiencia operativa que elevó la productividad del 44 % al 53 %. Este resultado es consistente con lo expuesto por Chen et al. (2020), quienes indican que la implementación de sistemas de ejecución de manufactura (MES) en la industria de alimentos y bebidas facilita la integración de modelos de datos que optimizan la supervisión y permiten una respuesta inmediata ante desviaciones en la producción.

Al liberar al personal de tareas manuales repetitivas, se logró una optimización del flujo de información que empodera al nivel operativo. Este fenómeno de empoderamiento tecnológico coincide con los hallazgos de Rusch (2018), quien afirma que la visibilidad total de los procesos no solo reduce costos, sino que mejora la capacidad de respuesta y la competitividad en entornos de manufactura complejos.

En cuanto a la toma de decisiones, la visualización de variables críticas en tiempo real facilitó la identificación oportuna de desviaciones en la línea 3. La convergencia tecnológica

planteada por la Industria 4.0 exige una transformación en la forma en que se capturan y procesan los datos operativos. Según Almada-Lobo (2016), el sistema MES actúa como el núcleo de esta revolución facilitando la transparencia de los procesos y permitiendo que la información en tiempo real se convierta en una ventaja competitiva para la organización.

Es importante destacar que el incremento del 9 % en la productividad operativa y la reducción de las paradas de mantenimiento del 18 % al 10 % no son eventos aislados, sino que guardan una relación de causalidad directa con la implementación del sistema SCADA. Al eliminar la latencia informativa el tiempo ciego, el personal técnico pudo intervenir de forma inmediata ante microparadas que antes pasaban desapercibidas en los registros manuales. La estabilidad de estos datos durante el periodo de evaluación confirma que la automatización es el factor determinante en la optimización de la línea.

A pesar de los resultados favorables, esta investigación presenta limitaciones que deben ser consideradas para futuros estudios. El alcance se circunscribió a una muestra de 41 trabajadores de una sola línea de envasado, lo que sugiere precaución al generalizar los hallazgos a otras áreas industriales. Asimismo, se reconoce un posible sesgo de observación derivado de la adaptación del personal al nuevo entorno digital. No obstante, al contrastar estos datos con Rojko (2017), se confirma que la transición hacia sistemas ciberfísicos permite la automatización del flujo de información, lo cual actúa como un catalizador para optimizar la producción y establecer estrategias de mantenimiento predictivo que superen los límites de los modelos de gestión tradicionales.

Finalmente, la transición hacia un monitoreo constante impactó positivamente en la seguridad y el mantenimiento. Como sostienen Alcácer y Cruz-Machado (2019), la integración de tecnologías en los sistemas de manufactura requiere un análisis previo de la infraestructura para garantizar la interoperabilidad de los activos, que permita así una transición efectiva hacia entornos de fabricación inteligentes.

La capacidad del sistema propuesto para registrar históricos y activar alarmas automáticas ante fallos refuerza esta postura. Ello demuestra que la integración de indicadores jerárquicos bajo estándares de manufactura 4.0 es la ruta más viable para la sostenibilidad industrial.

## CONCLUSIONES

Sobre la factibilidad integral, se determinó que la empresa posee la disponibilidad total de recursos operativos, técnicos y económicos necesarios para la ejecución del sistema.

Respecto del diseño sistémico, se desarrolló una plataforma digital que automatiza indicadores de eficiencia, productividad y paradas. Ello elimina el registro manual para permitir una respuesta funcional inmediata.

Con relación a la implementación y al alcance, el sistema integra el monitoreo en tiempo real de métricas críticas como cajas producidas, velocidad de llenadora y tiempos operativos (TR), visualizando de forma simultánea cuatro indicadores clave de mantenimiento y producción.

Sobre el impacto cuantitativo, la optimización del método de gestión generó un incremento en la productividad operativa de la línea, pues la elevó de un 44 % a un 53 %.

De la excelencia operativa se concluye que la reducción de la latencia informativa y la mejora en los tiempos de respuesta establecen una base sólida para la sostenibilidad bajo estándares de manufactura 4.0.

La transición de un modelo de gestión manual, propenso a errores de transcripción y latencia informativa, hacia un sistema de indicadores jerárquicos en tiempo real representa la base de la transformación digital en la planta. Los resultados obtenidos tras la implementación del prototipo no solo validan la factibilidad técnica, sino que demuestran una reducción crítica en los tiempos ciegos de la gerencia.

Como líneas futuras de investigación, se contempla el escalado de este sistema a las otras líneas de la planta y la integración de algoritmos de inteligencia artificial para el mantenimiento predictivo basado en los históricos ya automatizados.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

El autor declara no tener conflictos de interés.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

**Ali José Céspedes Vera:** conceptualización, *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, *software*, visualización, escritura: borrador original, escritura: revisión y edición.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE IA GENERATIVA

Los autores utilizaron herramientas de IA generativa únicamente para mejorar la redacción, gramática y claridad del manuscrito. La interpretación de resultados, análisis y conclusiones corresponden exclusivamente a los autores.

## REFERENCIAS

Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(3), 899-919. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>

- Allen, L., Atkinson, J., Jayasundara, D., Cordiner, J., & Moghadam, P. Z. (2021). Data visualization for Industry 4.0: A stepping-stone toward a digital future, bridging the gap between academia and industry. *Patterns*, 2(5), 100266. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100266>
- Almada-Lobo, F. (2016). The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management*, 3(4), 16-21. [https://doi.org/10.24840/2183-0606\\_003.004\\_0003](https://doi.org/10.24840/2183-0606_003.004_0003)
- Chen, X., Nophut, C., & Voigt, T. (2020). Manufacturing execution systems for the food and beverage industry: A model-driven approach. *Electronics*, 9(12), 2040. <https://doi.org/10.3390/electronics9122040>
- Foro Económico Mundial, & McKinsey & Company. (2023). *Global Lighthouse Network: Shaping the Next Chapter of the Fourth Industrial Revolution*. Foro Económico Mundial. <https://www.weforum.org/publications/global-lighthouse-network-shaping-the-next-chapter-of-the-fourth-industrial-revolution/>
- Groover, M. P. (2019). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems* (7.ª ed.). Wiley.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación* (5.ª ed.). McGraw-Hill.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance* (2.ª ed.). Industrial Press Inc.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press.
- Negri, E., Berardi, S., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2020). MES-integrated digital twin frameworks. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 58-71. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.05.007>
- Parella Stracuzzi, S., & Martins Pestana, F. (2012). *Metodología de la investigación cuantitativa* (3.ª ed.). Fedupel.
- Pinzón Galán, S. (2019, 1 de octubre). *La transformación digital, una oportunidad para la productividad*. Asociación Nacional de Empresarios de Colombia. <http://www.andi.com.co/Home/Noticia/15543-la-transformacion-digital-una-oportunidad>
- Rojko, A. (2017). Industry 4.0 concept: Background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 11(5), 77-90. <https://doi.org/10.3991/ijim.v11i5.7072>
- Ruiz Bolívar, C. J. (2013). *Instrumentos y técnicas de investigación educativa: Un enfoque cuantitativo y cualitativo para la recolección y análisis de datos* (3.ª ed.). DANAGA Training and Consulting. [https://www.academia.edu/37886948/Instrumentos\\_y\\_Tecnicas\\_de\\_Investigaci%C3%B3n\\_Educativa\\_Carlos\\_Ruiz\\_Bolivar\\_pdf](https://www.academia.edu/37886948/Instrumentos_y_Tecnicas_de_Investigaci%C3%B3n_Educativa_Carlos_Ruiz_Bolivar_pdf)

Rusch, S. (2018, 20 de enero). *Lleve a su empresa hacia la excelencia operativa*. Digital360 Iberia. <https://www.computing.es/analytics/lleve-a-su-empresa-hacia-la-excelencia-operativa/>

Senn, J. (2005). *Análisis y diseño de sistemas de información* (2.ª ed.). McGraw Hill.

Silva, L. C. (1997). Capítulo 3. Escalas e indicadores. En L. C. Silva (Ed.), *Cultura estadística e investigación científica en el campo de la salud: una mirada crítica* (pp. 43-58). Díaz de Santos.

Terry, S., Lu, H., Fidan, I., Zhang, Y., Tantawi, K., Guo, T., & Asiabanpour, B. (2020). The influence of smart manufacturing towards energy conservation: A review. *Technologies*, 8(2), 31. <https://doi.org/10.3390/technologies8020031>

# DISCRETE-EVENT SIMULATION OF THE COCOA VALUE CHAIN IN PUERTO ASÍS, COLOMBIA: COMPARATIVE EFFECTS OF TECHNIFICATION AND WORKFORCE SCALING

JAMES MAURICIO ENRÍQUEZ RODRÍGUEZ  
<https://orcid.org/0009-0009-4704-3191>

MÓNICA LIZETH SÁNCHEZ ARÉVALO  
<https://orcid.org/0000-0001-8871-1912>

Facultad de Ingeniería, Corporación Universitaria Iberoamericana, Colombia

Received: January 22, 2026 / Accepted: March 11, 2026

Published: June 15, 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8548>

**ABSTRACT.** This study presents a detailed case analysis of the cocoa value chain in Puerto Asís, Colombia, using discrete-event simulation to evaluate the impacts of technification and workforce scaling on post-harvest productivity. We calibrated a baseline model that represents traditional practices using field data, achieving validation with a relative error below 5 %. We assessed four intervention scenarios through comparative performance analysis and one-way ANOVA ( $p < 0,05$ ). The baseline model required 14,3 days to complete the post-harvest cycle, incurring losses of 22 %. The most efficient configuration, which integrated solar drying infrastructure and optimized workforce allocation (C1), reduced processing time to 8,2 days (43 % reduction) and decreased losses to 10 %, while enhancing production stability. The results indicate that moderate labor optimization, when combined with technological advancements, yields significantly greater improvements in processing time, loss reduction, and production stability compared to isolated labor expansion under

---

This research was funded by the Corporación Universitaria Iberoamericana, Banco de Proyectos y Programas de Investigación e Innovación Ibero 2025, code 202510D007.

\* Corresponding author

E-mail addresses in order of appearance: [james.enriquez@docente.ibero.edu.co](mailto:james.enriquez@docente.ibero.edu.co);  
[monica.sanchez@docente.ibero.edu.co](mailto:monica.sanchez@docente.ibero.edu.co)

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

identical operational conditions. Furthermore, the simulation framework developed in this study serves as a replicable decision-support tool for rural cocoa systems operating under structural constraints.

KEYWORDS: simulation / FlexSim / cocoa value chain / sustainable rural development

## SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS DE LA CADENA DE VALOR DEL CACAO EN PUERTO ASÍS, COLOMBIA: EFECTOS COMPARATIVOS DE LA TECNIFICACIÓN Y LA AMPLIACIÓN DE LA FUERZA LABORAL

RESUMEN. Este estudio presenta un análisis aplicado de la cadena de valor del cacao en Puerto Asís, Colombia, utilizando simulación de eventos discretos para evaluar el impacto de la tecnificación y de la ampliación de la fuerza laboral sobre la productividad del proceso poscosecha. Se construyó un modelo base que representa las prácticas tradicionales de procesamiento, calibrado con datos de campo y validado con un error relativo inferior al 5%. A partir de este modelo se analizaron cuatro escenarios de intervención mediante comparación de desempeño y ANOVA de una vía ( $p < 0,05$ ). El escenario base presentó un tiempo total de 14,3 días para completar el ciclo poscosecha y pérdidas del 22%. La configuración más eficiente, que integra secado solar y una asignación optimizada de la mano de obra, redujo el tiempo a 8,2 días (43%) y las pérdidas al 10%. Los resultados evidencian que la tecnificación combinada con optimización laboral mejora significativamente la eficiencia y estabilidad productiva del sistema.

PALABRAS CLAVE: simulación / FlexSim / cadena de valor del cacao / desarrollo rural sostenible

## INTRODUCTION

The cocoa value chain in Colombia currently represents one of the most significant strategies for promoting sustainable rural development and facilitating the transition toward legal agricultural economies in post-conflict territories (Hernanz et al., 2024). In regions such as Puerto Asís, Putumayo, cocoa cultivation has progressively established itself as a viable productive alternative that generates income, strengthens local organizations, and fosters socially inclusive agricultural systems (Apraez Muñoz et al., 2024). Despite these advances, the sector continues to confront structural challenges that impact its productivity and competitiveness, particularly in rural areas where technological resources, infrastructure, and coordination among stakeholders remain inadequate (Enriquez, 2019).

At the national level, the cocoa production system primarily comprises small-scale producers who operate under traditional management schemes and have limited access to post-harvest technologies and specialized logistics infrastructure (Hernanz et al., 2024). These conditions frequently lead to inefficiencies in fermentation, drying, storage, and transportation processes, which consequently impact product quality, elevate operational costs, and hinder producers' ability to meet the standards required by differentiated markets (Hayat et al., 2024). Therefore, the overall performance of the cocoa value chain relies significantly on the organization of its processes, the availability of resources, and the efficiency with which stakeholders manage post-harvest operations.

From a conceptual perspective, the value chain framework offers a systemic approach to analyzing the sequence of activities that generate value, spanning from primary production to final commercialization (Helmold, 2020). In the agro-industrial context, the cocoa value chain encompasses multiple stages—including cultivation, harvesting, fermentation, drying, storage, transportation, and marketing—interconnected through economic, logistical, and organizational relationships among producers, cooperatives, intermediaries, and market agents (Awafo & Owusu, 2022). Therefore, factors such as agronomic conditions, operational coordination, infrastructure availability, and institutional support mechanisms significantly influence the performance of this system.

In rural territories such as Puerto Asís, the efficiency of the cocoa production chain strongly depends on labor availability, the level of technological adoption in post-harvest processes, and local actors' ability to coordinate logistics and commercialization activities (Apraez Muñoz et al., 2024). The lack of adequate drying technologies, insufficient storage infrastructure, and unreliable transport systems often result in prolonged processing times and post-harvest losses, diminishing both the economic profitability and commercial potential of cocoa production (Hayat et al., 2024). These challenges underscore the necessity for analytical approaches that evaluate the system's behavior under various operational conditions and identify opportunities for improvement.

From the perspective of industrial engineering, the cocoa value chain can be viewed as a dynamic system characterized by the flow of materials and information. In this system, the interactions among resources, capacities, and processing times critically influence overall performance (Cortés et al., 2025). Improvements made at a local level can generate systemic effects throughout the entire chain, highlighting the importance of analyzing interactions between different stages rather than evaluating each process in isolation. Consequently, computational modeling and simulation have emerged as essential tools for representing complex production systems and assessing the impact of various operational configurations prior to their implementation (Turner et al., 2025).

Discrete-event simulation (DES) serves as a powerful tool for researchers to replicate the dynamic behavior of production and logistics systems by accurately modeling processes, resources, queues, and stochastic variability within a controlled digital environment. This methodology enables the identification of bottlenecks, the evaluation of resource utilization, and the testing of improvement scenarios related to technological upgrades or organizational adjustments, all while avoiding interference with actual operations. In agro-industrial systems that are characterized by variability and constrained infrastructure, simulation models offer a rigorous analytical framework that supports evidence-based decision-making.

In this context, this study investigates the operational dynamics of the cocoa value chain in the municipality of Puerto Asís by developing a discrete-event simulation model implemented in FlexSim. Utilizing empirical data gathered through field observations, interviews with producers, and documentary analysis, the model delineates the key processes involved in post-harvest management and distribution. The simulation environment facilitates the evaluation of various operational scenarios that target the enhancement of workforce availability and the integration of technological advancements in drying and fermentation processes.

The remainder of this paper is structured as follows: Section II presents the theoretical foundations concerning value chains and simulation modeling in agro-industrial systems. Section III articulates the methodological framework and details the construction of the discrete-event simulation model in FlexSim, including its parameterization and validation procedures. Section IV presents the results obtained from the baseline model and conducts a comparative evaluation of the experimental scenarios. Section V explores the implications of these findings with respect to productivity improvement and technological adoption within rural cocoa systems. Finally, Section VI summarizes the main conclusions and suggests directions for future research.

## Theoretical Framework

### *System Simulation as a Decision-Making Tool*

Discrete event simulation (DES) represents one of the most widely used methodologies in industrial engineering for the representation of complex processes (Possik et al., 2023). This approach aims to accurately and quantitatively reproduce the behavior of a system by utilizing models that depict material flows, the resources involved, and the interactions among its components (Kienzlen & Verl, 2024).

In agro-industrial chains, this technique enables the evaluation of scenarios without altering the real system, thereby reducing the risks associated with decision-making and facilitating the identification of strategies that most effectively enhance productivity and sustainability (Kienzlen & Verl, 2024; Paulo et al., 2022). The application of simulation in rural contexts allows for a comprehensive analysis of improvement alternatives—such as increasing personnel, advancing technological integration, or reorganizing logistics—under conditions characterized by variability, resource limitations, and seasonal production (Liu, 2025; Smith et al., 2024).

The FlexSim tool utilized in this study enables the modelling of processes through functional blocks that represent operations, waiting times, resources, and logistics flows (Hering et al., 2021; Lorenc, 2024). Researchers employ this tool to quantify performance indicators such as resource utilization, cycle times, losses, and overall system efficiency (Eugenija, 2022). Consequently, simulation serves not only an analytical purpose, but also pedagogical and strategic functions by visualizing the impacts of decisions on the overall behavior of the system (Pérez et al., 2026).

### *Optimization and Improvement in Rural Production Systems*

The concept of optimization within agro-industrial systems entails the pursuit of configurations that enhance the overall system, reduce losses, and optimize the utilization of available resources (Sergeyeva, 2020; Zhdanov et al., 2021). Specifically for cocoa, the pivotal factors for enhancement include labor availability, drying and storage capacity, and the minimization of downtime within the logistics chain (Malik et al., 2025; Quintero-García et al., 2025).

The utilization of simulation models facilitates the analysis of the system's sensitivity to variations in these factors and enables projection of their effects on productivity and sustainability (Da Paixão Alves et al., 2025; Kharraz & Szabó, 2025). Implementing strategies such as increasing the operational workforce or introducing controlled drying technologies leads to substantial reductions in total processing time and post-harvest losses (Sharma et al., 2025; Zhu et al., 2021).

In rural environments with limited resources, optimizing production through simulation presents a viable alternative that mitigates the need for costly experimental investments and facilitates the prioritization of improvements based on their operational and social returns (Huo et al., 2022; Yu et al., 2025). This approach effectively integrates the quantitative rationality inherent in engineering with a nuanced understanding of local realities.

### *Social Appropriation of Knowledge in Rural Chain Management*

Social appropriation of knowledge (SAK) is defined as a process in which social actors actively participate in generating, validating, and applying scientific and technological knowledge (Ramos-García et al., 2024; Romero-Rodríguez et al., 2020). Within the agro-industrial context, SAK facilitates the integration of local producers' knowledge with analytical tools developed by academic institutions, thereby fostering collective learning and enhancing the sustainability of innovations (Kondratenko et al., 2024; Rushchitskaya et al., 2025).

The participatory approach implemented in this study incorporated co-creation workshops, validation spaces, and participatory simulation sessions with producers in the municipality of Puerto Asís. This strategy strengthened trust among the stakeholders, enabled the adaptation of model parameters to reflect the actual conditions of the territory, and enhanced the producer community's understanding of the results (Pelzer et al., 2020).

The simulation emerged as a robust technical analysis tool and a means for knowledge transfer and appropriation, thereby enhancing producers' capacity to interpret, make decisions, and plan their own production systems (Cao & Tao, 2025; Lopera Molano, 2022). The intersection of simulation and social appropriation constitutes a significant methodological contribution to rural chain management, synthesizing the precision of computational modeling with the legitimacy of collective knowledge (Rodríguez & Sánchez, 2023; Wang et al., 2025).

## **METHODOLOGY**

### **Research Design and Analytical Strategy**

This study represents an applied case analysis of the cocoa value chain in Puerto Asís, Colombia, specifically emphasizing the post-harvest processing subsystem. The research methodologically integrates empirical data collection with discrete-event simulation to assess operational performance across various technological and labor configurations.

The unit of analysis pertains to the post-harvest cycle, encompassing the fermentation and drying processes. Researchers obtained empirical data through field observations, production records, and direct interaction with producers, thereby ensuring that the baseline model accurately reflects the actual operating conditions of the association. Additionally,

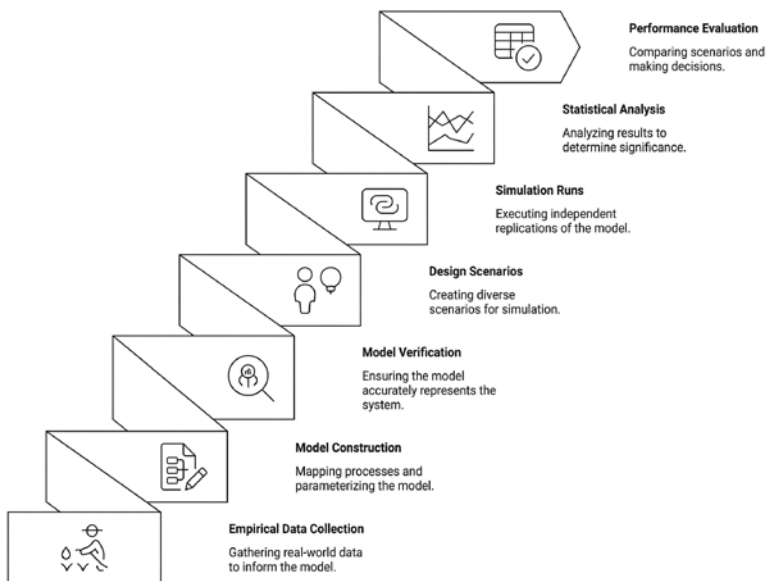
the researchers calibrated the simulation model against observed cycle times to ensure consistency between empirical and simulated performance.

Instead of using a mathematical optimization algorithm, this study employs a scenario-based performance evaluation approach. Researchers designed various configurations to evaluate the impacts of technological upgrades, specifically solar drying systems and workforce scaling strategies. The study simulated all scenarios under uniform external conditions to ensure structural comparability.

The selection of the optimal configuration relies on clearly defined decision criteria, specifically the minimization of total post-harvest processing time and the reduction of post-harvest losses. This comparative framework facilitates the identification of dominant operational configurations, underpinned by statistical analysis of simulation outputs.

**Figure 1**

*Conceptual framework of the simulation-based experimental design*



### Empirical Basis and Validation of the Model

The researchers constructed the model using a mixed approach that integrates empirical data collection in the field with the analytical structuring of processes through discrete event modeling techniques. They gathered primary information in Puerto Asís (Putumayo) by conducting semi-structured interviews with producers, organizing participatory workshops with cocoa associations, and directly observing operations at collection and drying centers (Apraéz Muñoz et al., 2024; Hernanz et al., 2024; Sánchez Garavito, 2021).

The foundational model was designed to encompass the logistical and operational components identified within the chain, which include fruit reception, fermentation, drying, storage, transport, and marketing. Each process was parameterized using average times, resource capacities, and loss rates, which local stakeholders validated (Cleland et al., 2023; Eremić Dodić et al., 2023; Ramos-García et al., 2024; Wolff & Knutas, 2023).

To ensure the representativeness of the system, we developed an iterative validation process that comprises two complementary phases: (i) Technical verification of the model, which aims to ensure the consistency of flows, process times, and resource availability in FlexSim (Eugenija, 2022; Poloczek, 2025; Sreekar et al., 2020), (ii) Participatory validation, conducted through simulation sessions with producers and technicians, during which we compared the behavior of the model with the actual dynamics of the chain (Khuwaileh & Ababneh, 2020; Wang et al., 2020).

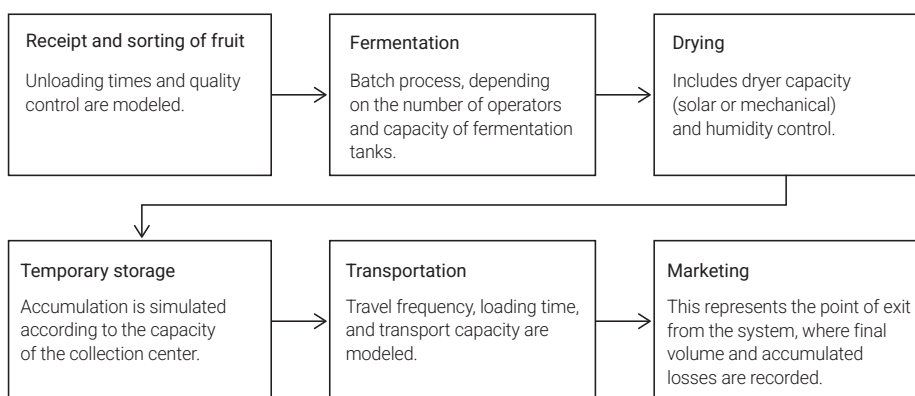
This dual validation process facilitated the establishment of a reliable model that accurately represents the operational context of cocoa in Puerto Asís, and serves as an effective participatory analysis tool for informed decision-making.

### Conceptual Model of the Cocoa Value Chain

The developed model integrates the functional structure of the agro-industrial value chain, effectively representing the main processes and material flows through a sequence of interconnected modules (Akimbekova et al., 2025; Botero Montoya et al., 2024; Yani et al., 2022). Figure 2 depicts the general flow of the system as modeled in FlexSim.

**Figure 2**

*Conceptual model of the cocoa value chain in Puerto Asís (Putumayo)*



## Experimental Scenarios and Operational Parameters

After verifying the base model, researchers established experimental scenarios to evaluate the effects of two operational improvement strategies: (i) increasing the available labor force, and (ii) technification of post-harvest processes (Gerasymenko, 2023; Lavrina et al., 2022; Savitri et al., 2022; Smirnova & Postnova, 2020). These scenarios are described in Table 1.

**Table 1**

*Configuration of Experimental Scenarios*

Scenario	Main intervention	Parametric change	Expected impact
Base	Current situation	—	Total time: 14,3 days; losses: 22 %
A1	+20 % staff	Increase in fermentation and drying operators	Time ↓ 11,8 days; losses ↓ 17 %
A2	+40 % staff	Seasonal or cooperative hiring	Time ↓ 10,5 days; losses ↓ 15 %
T1	Technification level 1	+25 % drying capacity (solar dryer)	Time ↓ 10,2 days; losses ↓ 14 %
T2	Technification level 2	+50 % capacity and –10 % fermentation time	Time ↓ 8,9 days; losses ↓ 12 %
C1	Combined	+30 % personnel +25 % technification	Time ↓ 8,2 days; losses ↓ 10 %

## Running Comparative Simulations in FlexSim

The research team implemented the model in FlexSim 2024, employing discrete-event simulation (DES) logic (Eugenija, 2022). The study conducted comparative simulations over a one-year production horizon, under the assumption of stable demand for dry cocoa and constant availability of raw materials.

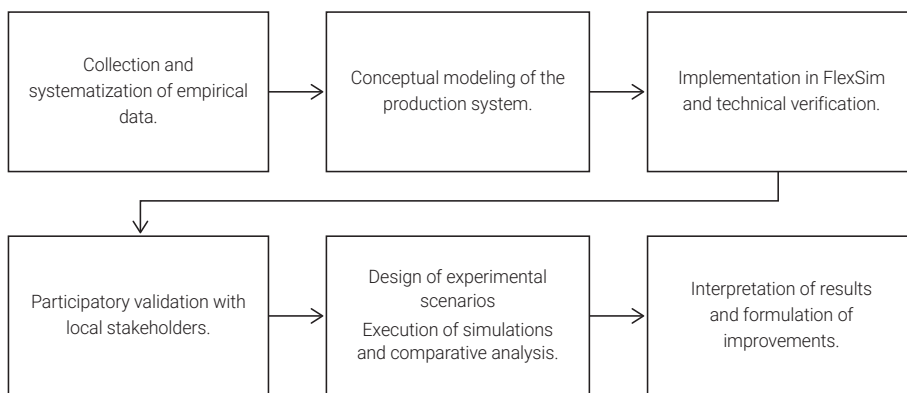
To ensure statistical stability and minimize random variability, each scenario underwent ten replications (Khuwaileh & Ababneh, 2020). Preliminary pilot runs indicated that after approximately eight replications, the variation in key performance indicators—especially total processing time and resource utilization—stabilized, yielding relative deviations below 3 %. Consequently, the team determined that ten replications were adequate to ensure convergence of the mean values and enable reliable comparisons among the various scenarios.

Although researchers did not implement a formal Common Random Numbers (CRN) variance reduction scheme, they executed all scenarios under identical structural and operational configurations of the model. Prior to comparative evaluation, the study verified the convergence of mean values, thereby ensuring that performance differences between the scenarios result from structural interventions rather than stochastic dispersion.

Figure 3 illustrates the methodological procedure employed in the development, verification, validation, and analysis of the simulation model. This sequence of stages adheres to the methodological approach commonly utilized in simulation-based production studies, which encompasses conceptual modeling, parameterization, verification, validation, and experimental scenario evaluation (Khuwaileh & Ababneh, 2020; Kristiana et al., 2023).

**Figure 3**

*Methodological diagram of model construction and simulation*



### Model Parameterization

The simulation model necessitated the formal definition of operational, logistical, and stochastic parameters to ensure the internal coherence of the processes represented in FlexSim. This parameterization integrates empirical observations gathered during fieldwork, production records supplied by local associations, and technical assumptions aligned with rural agro-industrial systems. To maintain the fidelity of the system, process times, capacities, operator availability, and loss factors were validated collaboratively with producers during participatory sessions.

The inputs are categorized into six distinct groups: (i) batch configuration and annual capacity, (ii) time parameters related to reception, fermentation, drying, storage, and transport, (iii) resource constraints encompassing labor availability and equipment capacity, (iv) stochastic distributions reflecting the variability in operations and environmental conditions, (v) scenario-dependent parameters concerning personnel increases and post-harvest technification, and (vi) global simulation parameters that include the time horizon, number of replications, arrival rates, and random seed configuration.

Table 2 presents a comprehensive set of inputs utilized in the model. These parameters establish the baseline configuration from which the experimental scenarios (A1, A2, T1, T2, C1) are developed. The table also indicates the source of each parameter, classifying them

as empirical, assumed, or analytically derived, and outlines the probability distributions assigned to processes exhibiting inherent variability. This structured parameterization ensures transparency, reproducibility, and analytical robustness in the simulation outcomes.

**Table 2***Model Parameters Used in the Simulation*

Parameter	Symbol	Base value	Unit	Source	Distribution	Technical note
Annual pressing capacity	CAP_AN	5200	kg/year	Empirical	Constant	Based on observed annual output
Batch size	BATCH_SIZE	100	kg	Empirical–Assumed	Constant	Equivalent to 52 batches/year
Dispatch frequency	FREQ_TRANS	1	trips/week	Empirical	Constant	Increases to 2 trips/week in optimized scenarios
Reception time	T_REC	0,5	days	Empirical	Triangular (0,4–0,5–0,7)	Per batch
Fermentation time	T_FERM	5,0	days	Empirical	Triangular (4,5–5,0–5,5)	Sensitive to labor availability
Drying time	T_DRY	6,0	days	Empirical	Triangular (5,5–6,0–6,5)	Main bottleneck
Storage time	T_STORE	1,8	days	Empirical	Triangular (1,5–1,8–2,2)	Pre-transport buffer
Verified total time	T_TOTAL	14,3	days	Calculated	–	Sum of all operational stages
Dryer utilization	U_DRY	95	%	Empirical	–	High saturation level
Post-harvest losses	LOSS_BASE	22	%	Empirical	–	Due to moisture and over-fermentation
Fermentation operators	OP_FERM	4	persons	Empirical	–	Increased in A1/A2
Drying operators	OP_DRY	2	persons	Empirical	–	Critical resource
Handling operators	OP_HAND	2	persons	Empirical	–	Turning, sorting, transfers
Transport personnel	OP_TRANS	1	persons	Empirical	–	Adjustable in C1
Dryer capacity (baseline)	CAP_DRY	100	kg/batch	Assumed	–	Standard rural dryer
Dryer capacity T1	CAP_DRY_T1	125	kg/batch	Assumed	–	+25% capacity

*(continues)*

(continued)

Parameter	Symbol	Base value	Unit	Source	Distribution	Technical note
Dryer capacity T2	CAP_DRY_T2	150	kg/batch	Assumed	—	+50 % capacity
Fermentation reduction T2	RED_FERM_T2	10	%	Assumed	—	Reduces fermentation to 4,5 days
Replications	N_REP	10	runs	Methodological	—	Stability of stochastic outputs
Simulation horizon	HORIZON	365	days	Methodological	—	One-year operation
Arrival rate	ARR_DIST	0,142	batches/day	Empirical–Assumed	Poisson	52 batches per year
Dry yield	YIELD	0,90	ratio	Empirical	Triangular (0,88–0,90–0,92)	Dry/wet conversion
Loading time	T_LOAD	0,25	days	Empirical	Triangular (0,15–0,25–0,40)	Per transport event
Transport time	T_TRAVEL	1,0	days	Empirical	Triangular (0,8–1,0–1,5)	Rural road conditions
CAPEX T1	CAPEX_T1	1200	USD	Estimated	—	Solar dryer
CAPEX T2	CAPEX_T2	5000	USD	Estimated	—	Mechanical dryer
Handling losses	LOSS_HAND	2	%	Assumed	—	Manual operations
Technification level	TECH_LVL	0	0–100 scale	Methodological	—	Base=0; T1=45; T2=75; C1=100
Climate variability	CLIMATE_VAR	10	%	Assumed	Sensitivity	Affects drying time
Random seed	RNG_SEED	2025	—	Methodological	—	Ensures reproducibility

### Verification and Validation (V&V)

A verification and validation (V&V) procedure was conducted to ensure the reliability of the FlexSim model. The verification process focused on confirming the internal logic of process flows, resource interactions, and event sequencing through block-level inspections and extreme-case behavior tests. The model demonstrated stable behavior across all stress tests.

Validation involved an empirical comparison with field data and participatory sessions with local producers. The observed performance indicators—processing time, dryer

utilization, losses, and throughput—were compared against the outputs of ten simulation replications. Researchers applied calibration adjustments to fermentation and drying times, loss factors, and arrival rates until the error levels fell within acceptable ranges (Table 3).

**Table 3**

*Summary of V&V accuracy indicators*

Indicator	Observed	Simulated	% Error
Total processing time (days)	14,3	14,1	1,4 %
Dryer utilization (%)	95	93,8	1,3 %
Post-harvest losses (%)	22	21,1	4,1 %
Annual production (kg)	5200	5140	1,1 %

*Note.* The observed low error values (all <5%) validate that the model accurately represents actual operational conditions and demonstrates its appropriateness for assessing alternative operational scenarios.

Model verification aimed to ensure the logical consistency of the process flow, entity routing, and resource allocation within the simulation structure. To achieve validation, we employed empirical calibration that utilized observed postharvest cycle times and operational data collected from the production system, supplemented by expert reviews from field specialists.

A relative error of less than 5 % between simulated and observed cycle times is considered acceptable for model validation, aligning with the established simulation standards used in discrete-event modeling studies.

To maintain experimental consistency, all scenarios were simulated under identical external conditions. Input parameters related to raw material availability, fermentation duration, climatic assumptions affecting drying performance, and demand levels remained constant throughout the experiments. Only the internal configuration variables associated with technological upgrading, specifically the implementation of solar drying systems, and workforce allocation were adjusted. This controlled structure ensures structural comparability among scenarios, thereby allowing the observed performance differences to be attributed solely to the intervention strategies evaluated.

## RESULTS

### Results of the baseline simulation

The initial model accurately reflects the configuration observed at the collection and processing centers in the municipality of Puerto Asís. Table 4 presents a summary of the performance indicators of the system in its baseline state, highlighting prolonged processing times and elevated levels of resource utilization.

**Table 4**  
*Performance indicators of the baseline system*

Indicator	Observed value	Interpretation
Average total time per batch	14,3 days	Excessive time in the system; bottlenecks in drying
Dryer utilization	95 %	High operational saturation; risk of overload
Post-harvest losses	22 %	Derived from excess moisture and prolonged fermentation
Annual processing capacity	5200 kg	Limited by human resources and equipment
Transport frequency	1 trip/week	Slow dispatch rate; accumulation in storage

The analysis revealed that the drying stage constitutes the primary bottleneck within the system, while the fermentation process is heavily dependent on labor availability. These identified constraints informed the development of alternative operational scenarios, which were subsequently evaluated. In addition to comparing the scenarios, a statistical analysis of ten replicates per scenario was conducted to assess the stability and significance of the observed differences. The descriptive values presented in Table 5 indicate a progressive decrease in the total system time, accompanied by a reduction in variability as personnel levels and degrees of technification increase. The combined scenario (C1) achieved the shortest average duration (8,20 days) and exhibited the lowest dispersion, demonstrating a more stable post-harvest flow behavior.

**Table 5**  
*Descriptive statistics for total processing time (days)*

Scenario	Mean	SD	Min	Max
Base	14,30	0,42	13,7	14,9
A1	11,80	0,38	11,2	12,4
A2	10,50	0,33	9,9	11,0
T1	10,20	0,31	9,7	10,6
T2	8,90	0,27	8,5	9,4
C1	8,20	0,25	7,8	8,6

### Statistical Analysis

Each scenario underwent simulation with ten independent replications to ensure statistical robustness and stability of the performance estimators. A confidence level of 95 % was utilized for all statistical comparisons. To evaluate differences in total processing time across scenarios, one-way ANOVA was employed, as this method allows for the comparison

of multiple experimental configurations under controlled conditions. Before conducting the analysis, the assumptions of normality and independence of observations were verified based on the outputs from the replications. A relative error of less than 5% and consistent variance patterns across replications affirmed the validity of the parametric approach.

ANOVA analyses revealed statistically significant differences between the scenarios ( $p < 0,001$ ). Furthermore, post-hoc tests demonstrated that C1 significantly differs from all individual interventions, while the technification scenarios exhibit greater improvements compared to staff increases. These findings underscore the efficacy of the combined approach in reducing overall system time and stabilizing the production process.

### Improvement Scenarios: Increase in Personnel and Technification

The study evaluated six experimental scenarios (Base-A1-A2-T1-T2-C1), as defined in the methodology section. Table 6 provides a comparative analysis of the key indicators following execution of the simulations.

**Table 6**

*Comparison of simulated scenarios*

Scenario	Total time (days)	Losses (%)	Dryer use (%)	Annual production (kg)	Transport frequency
Base	14,3	22	95	5200	1/week
A1 (+20 % staff)	11,8	17	90	6100	1/week
A2 (+40 % staff)	10,5	15	88	6750	2/week
T1 (Level1 Technical Training)	10,2	14	75	7000	2/ week
T2 (Level 2 Technical Training)	8,9	12	70	7800	2/ week
C1 (Combined)	8,2	10	68	8000	2/week

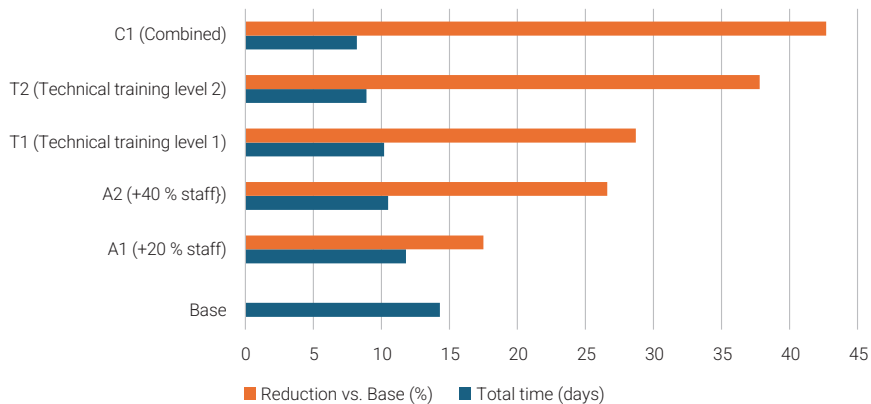
### Comparative Performance Analysis

Figure 4 illustrates the variation in total system time across the simulated scenarios. The analysis reveals a progressive reduction in processing time, culminating in a 43% improvement over the base model in the combined scenario (C1).

Figure 5 illustrates the relationship between the level of technification and post-harvest losses. The observed downward trend indicates that the incorporation of controlled drying technologies directly reduces losses, thereby enhancing the final quality of the product and stabilizing the logistics flow.

**Figure 4**

*Reduction in Total System Time per Experimental Scenario*



**Figure 5**

*Relationship between technification and post-harvest losses*

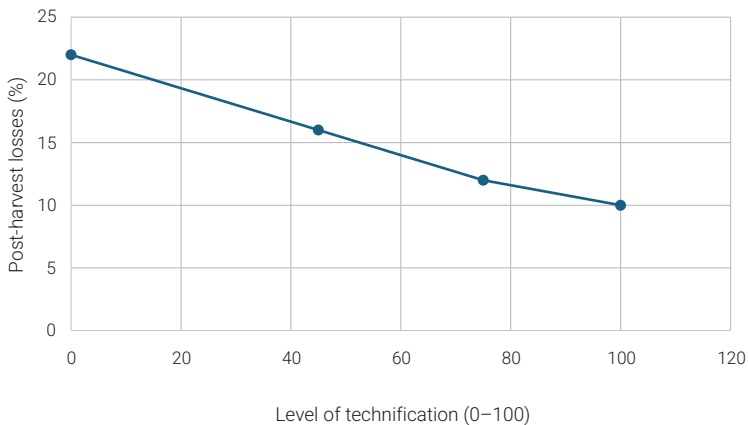
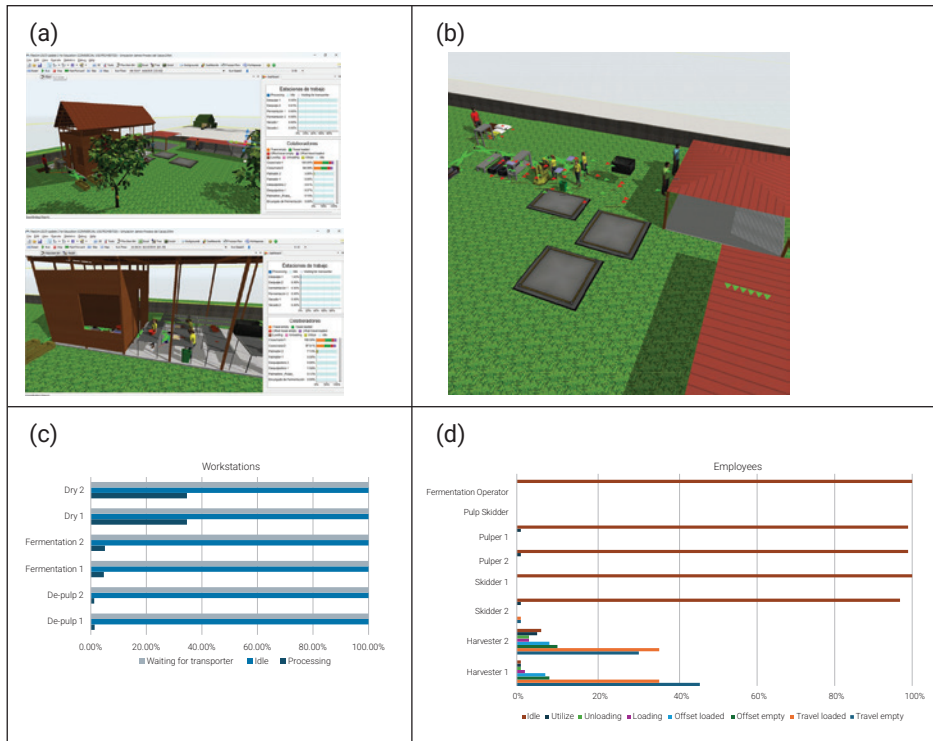


Figure 6 illustrates the operational behavior of the system across various levels of technification. The collection of graphs A–D presents a comprehensive overview of the progressive reductions in processing times, stabilization of flows, and decreases in post-harvest losses resulting from the incorporation of drying and humidity control technologies.

**Figure 6**

Summary of results by level of technification



### Interpretation of Results

The results indicate that both increased staffing and technical advancements lead to significant improvements in system efficiency, albeit with distinct operational implications:

- Increased staffing enhances flexibility and decreases fermentation and internal transfer times, while still maintaining a considerable reliance on manual labor.
- Conversely, technological advancements have a structural impact on performance by augmenting operational capacity and minimizing process variability.
- The combined scenario (C1) achieves the optimal balance between efficiency, flow stability, and loss reduction, illustrating that the synergy between these two factors yields the best overall system performance.

From the perspective of operations engineering, these results facilitate the development of progressive improvement strategies specifically tailored to the rural context. This process begins with the organization of cooperative work and subsequently incorporates low-cost technologies such as solar dryers and humidity sensors.

The comparative analysis reveals a distinct performance hierarchy among the evaluated scenarios. While incremental increases in labor (A1, A2) yielded only moderate reductions in total processing time, technification strategies (T1, T2) resulted in markedly larger improvements. The combined configuration (C1) achieved the most significant reduction in total system time, demonstrating up to 43 % improvement compared to the baseline scenario. These findings affirm that structural technological upgrades, particularly when synergistically integrated with workforce adjustments, yield substantially greater operational gains than labor scaling strategies implemented in isolation under identical external conditions.

Beyond the gains in operational efficiency, the observed reductions in total processing time carry significant sustainability implications. Shorter drying and storage cycles mitigate the risks of product deterioration and post-harvest losses, thereby improving material efficiency. The adoption of solar drying systems reduces dependence on fossil-fuel-based or inefficient traditional drying methods, thereby minimizing environmental impact. Furthermore, improved coordination and decreased idle times optimize resource utilization, aligning operational performance with the principles of sustainable rural production systems.

### **Social Impact and Participatory Validation**

The application of the Social Appropriation of Knowledge (SAK) process has been pivotal in interpreting and validating the results. Through participatory simulation sessions, producers actively recognized the impact of improvements on their operational flow and came to appreciate the value of simulation as a planning tool.

Additionally, the workshops facilitated the transfer of analytical and technological thinking skills, thereby enhancing the autonomy of local associations in managing their processes. This participatory component ensures that the proposed operational improvements are not only technically viable but also socially appropriate and sustainable.

## **DISCUSSION**

The results derived from the simulation model developed for the cocoa value chain in Puerto Asís (Putumayo) align with contemporary literature that addresses the challenges of sustainability, efficiency, and social participation within cocoa agro-industrial systems. Scholars generally agree that optimizing the value chain necessitates the integration of appropriate technologies, the social organization of producers, and the adoption of analytical tools, such as simulation, to enhance decision-making processes.

Numerous studies indicate that post-harvest management and logistical coordination among actors significantly influence the cocoa value chain. In the case of Colombia, the researchers Apraéz Muñoz et al. (2024) and Hernanz et al. (2024) highlight the importance

of coordination between producers and community organizations to improve bean quality and reduce the environmental vulnerability of production systems. Likewise, Caviedes Rubio et al. (2024) assert that the sustainability of the cocoa sector depends on the effective balancing of ecological, economic, and social impacts through the promotion of clean and equitable production practices.

Cortés et al. (2025) propose value chain models specifically designed to enhance the production of fine aroma cocoa in Arauca, emphasizing scalability and international competitiveness. In parallel, Da Paixão Alves et al. (2025) introduce the concept of a cocoa bioeconomy in the eastern Amazon, positioning it as a vital mechanism for both environmental conservation and rural development. These findings corroborate the results of the current study, which demonstrates a simultaneous improvement in operational efficiency and socioeconomic sustainability through the strengthening of local capacities and the incremental adoption of technologies.

Discrete event simulation has emerged as an effective tool for analyzing the dynamics of agro-industrial chains and projecting improvement scenarios. Mujica Mota et al. (2019) demonstrated that process-based simulation effectively identifies bottlenecks in cocoa logistics in Côte d'Ivoire. Additionally, Paulo et al. (2022) utilized discrete event modeling in biomass chains to optimize design and planning. In a similar context, Eugenija (2022) and Lorenc (2024) highlighted the potential of FlexSim as a modeling environment for industrial processes, thereby confirming its significance in agri-food systems.

Furthermore, research conducted by Castaneda et al. (2023) and Possik et al. (2023) highlights the importance of simulation as a tool for analyzing barriers to innovation and assessing manufacturing efficiency, thereby establishing a methodological foundation that aligns with the approach adopted in this study. Similarly, Poloczek (2025) and Eremić Dodić et al. (2023) demonstrate that material flow simulation, along with the application of quantitative methods, enables the prediction of the effects of operational decisions. The results from the model in Puerto Asís indicate that strategies aimed at enhancing labor and technification led to a notable 43 % improvement in overall efficiency. This finding corroborates the observations made by Sharma et al. (2025), who report comparable increases achieved through the implementation of smart solar dryers for temperate crops.

The integration of Social Appropriation of Knowledge (SAK) into rural chain management serves as a critical factor for sustaining innovations. Ramos-García et al. (2024) and Romero-Rodríguez et al. (2020) emphasize that participatory processes not only strengthen the legitimacy of scientific knowledge but also facilitate its application within local contexts. Similarly, Lopera Molano (2022) and Rodríguez and Sánchez (2023) identify knowledge appropriation as a vital mechanism for community empowerment in rural areas. This study involved producers in the construction and validation of the model, fostering a collective learning process akin to that described by Pelzer et al. (2020), wherein co-creation

promotes the transfer of knowledge and the adaptation of technological tools to meet local needs. The synergy of computational modeling and Agroforestry Systems for Cocoa (establishes a comprehensive methodological approach that effectively links technical rationality with social relevance, aligning with the perspectives of Kondratenko et al. (2024) and Rushchitskaya et al. (2025) on sustainability in agro-industrial complexes.

The transition to sustainable agro-industrial systems necessitates the integration of digital technologies, knowledge management, and organizational innovation. Akimbekova et al. (2025) and Botero Montoya et al. (2024) emphasize that digital transformation within the agro-industrial sector enhances efficiency through sustainability-oriented innovations, while Cao and Tao (2025) propose collaborative governance models designed to reconcile the interests of various stakeholders in agri-food chains. These contributions underscore the necessity for comprehensive strategies, such as those formulated in this study, in which simulation serves as a crucial tool for fostering sustainable and collaborative management.

The findings of this study offer insights that go beyond mere confirmatory evidence in the existing literature. The primary scientific contribution lies in the methodological advancement achieved through the structured integration of discrete-event simulation and participatory validation mechanisms within a rural post-conflict agro-industrial system. While prior research has either employed simulation tools or analyzed sustainability challenges in isolation, this study innovatively combines empirical calibration, statistically controlled scenario comparison, and Social Appropriation of Knowledge (SAK) within a cohesive experimental framework.

From an applied perspective, the study delivers quantified evidence regarding the magnitude of operational gains attainable through technification in smallholder cocoa systems under Amazonian conditions. The observed 43 % reduction in total processing time associated with the combined configuration offers a clear indication of productivity improvements in the cocoa post-harvest process. These findings are consistent with previous research emphasizing that enhancements in post-harvest management, processing infrastructure, and organizational coordination can significantly boost efficiency in smallholder cocoa systems (Apraez Muñoz et al., 2024; Caviades Rubio et al., 2024; Hernanz et al., 2024). In this context, the results indicate that the concurrent implementation of technification and workforce scaling can yield substantial operational gains in rural cocoa value chains.

At the territorial level, the proposed framework serves as a replicable analytical model for rural development contexts, particularly in National Comprehensive Program for the Substitution of Illicit Crops (PNIS) and post-conflict regions characterized by concurrent infrastructural limitations and labor constraints. By integrating simulation-based evaluation, statistical validation, and participatory co-creation, the study offers a transferable decision-support structure that can be adapted to various decentralized agricultural value chains.

However, the external applicability of the model hinges on context-specific parametrization. Variables such as patterns of harvest seasonality, labor availability and skill levels, conditions of transportation infrastructure, storage capacity, and the technological maturity of post-harvest operations significantly influence system throughput, utilization rates, and the potential for loss reduction. Consequently, replicating the model in other cocoa-producing regions requires local data calibration to maintain the model's validity and ensure that projected productivity gains accurately reflect structural conditions rather than contextual asymmetries.

## CONCLUSION

The simulation results clearly identified the operational dynamics that define the performance of the cocoa value chain in Puerto Asís. Scenario analysis revealed that the bottlenecks affecting system efficiency do not originate from a single source; instead they stem rather from the simultaneous interaction between labor limitations and technological constraints during the fermentation and drying stages. This observation accounts for the moderate improvements associated with partial interventions, while highlighting that integrated actions yield substantial changes in overall performance indicators.

The comparative evaluation indicated that the technification of the drying process is the most sensitive component of the system, primarily due to its direct influence on reducing postharvest losses and its role in stabilizing operational flow. The introduction of controlled-temperature equipment with greater capacity diminished variability between batches and shortened total processing times. Similarly, adjustments in workforce availability alleviated constraints related to manual handling, leading to reduced waiting times and minimized accumulated delays. The convergence of these measures in the combined scenario resulted in an approximate 43 % reduction in total cycle duration, thus confirming the synergistic nature of the interventions.

In addition to the quantitative outcomes, the process of social appropriation of knowledge contributed essential elements for validating the model and interpreting the findings within their territorial context. The active participation of producers enabled the contrasting of operational assumptions, refinement of parameters, and ensured that the proposed improvements were aligned with real conditions of the Amazonian rural environment. This collaborative approach enhanced the relevance of the simulations and facilitated an understanding of their practical implications.

Overall, this study demonstrates that discrete-event simulation serves as a robust tool for analyzing agro-industrial systems characterized by high operational variability. It supports decision-making in contexts where resources are limited and evidence-based planning is imperative. The findings confirm that the combination of technification and

workforce scaling constitutes a viable strategy for improving post-harvest productivity in the cocoa value chain, yielding positive effects on logistical efficiency, product quality, and the competitiveness of producers in the region.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflicts of interest.

## AUTHOR CONTRIBUTION

**James Mauricio Enríquez Rodríguez:** conceptualization, formal analysis, funding acquisition, investigation, methodology, project administration, resources, supervision, validation, visualization and writing original draft. **Mónica Lizeth Sánchez Arévalo:** data curation, formal analysis, funding acquisition, investigation, methodology, resources, supervision, validation, visualization, writing original draft, writing–review and editing.

## STATEMENT ON THE USE OF GENERATIVE AI

The authors used generative AI tools solely to improve the writing, grammar, and clarity of the manuscript. The interpretation of the results, analysis, and conclusions correspond exclusively to the authors.

## REFERENCES

- Akimbekova, G., Espolov, T., Baimukhanov, A., Tazhibayeva, R., & Kontselidze, N. (2025). Digital transformation in agro-industrial complex: Technological innovations for sustainable development. In J. Machado, J. Trojanowska, F. Soares, P. Rea, S. Butdee & B. Gramescu (Eds.), *Innovations in Mechatronics Engineering IV* [Lecture Notes in Mechanical Engineering]. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-94223-5\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-031-94223-5_36)
- Apraez Muñoz, J. J., Burgos Jimenez, G., & Burbano Ijaji, E. J. (2024). Caracterización morfoagronómica in situ de cacao nativo (*Theobroma cacao* L.) en Puerto Asís, Putumayo, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 81-102. <https://doi.org/10.22490/21456453.7569>
- Awafo, E. A., & Owusu, P. A. (2022). Energy and water mapping of the cocoa value chain in Ghana. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 341-356. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.027>
- Botero Montoya, L. H., Gutiérrez, N., Zuluaga, A., Gutiérrez, L. F., Gómez, J. O., Orozco, G. L., & Zartha, J. W. (2024). Proposal for sustainability-oriented innovation management

- model (MGI) for agro-industrial leather chain. *Sustainability*, 16(20), Article 8981. <https://doi.org/10.3390/su16208981>
- Cao, W., & Tao, X. (2025). A study on the evolutionary game of the four-party agricultural product supply chain based on collaborative governance and sustainability. *Sustainability*, 17(4), Article 1762. <https://doi.org/10.3390/su17041762>
- Castaneda, M., Herrera, M. M., & Méndez-Morales, A. (2023). A simulation-based approach for assessing innovation barriers in manufacturing firms. *Technology in Society*, 75, Article 102391. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102391>
- Caviedes Rubio, D. I., Parra García, F. E., & Andrade Vargas, K. C. (2024). Ecological, economic and social impacts of the Colombian cocoa sector. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 40(2), 50-64. <https://doi.org/10.17163/lgr.n40.2024.03>.
- Cleland, J., MacLeod, A., & Ellaway, R. H. (2023). CARDA: Guiding document analyses in health professions education research. *Medical Education*, 57(5), 406-417. <https://doi.org/10.1111/medu.14964>
- Cortés, M. F., Parra, K., Rodríguez, D., Ardila, C., Escobar, S., Van Hoof, B., Mura, I., Rodríguez, J., & Medaglia, A. L. (2025). A value chain modeling approach for upscaling the production of fine flavor cocoa in Arauca (Colombia). *International Transactions in Operational Research*, 32(4), 2215-2247. <https://doi.org/10.1111/itor.13563>
- Da Paixão Alves, V., Martin, D. G., Giannini, T. C., Junior, R. S., Guimarães, J. T. F., Moia, G. C. M., & Paes da Silva, R. N. (2025). The cocoa bioeconomy in the eastern Amazon: An integrated analysis of production, environmental degradation perceptions and socioeconomic factors among farmers. *Agricultural Systems*, 229, Article 104428. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104428>
- Enriquez, J. M. (2019). *Análisis de los procesos de gestión de la innovación en organizaciones agropecuarias de I+D+i del Putumayo* [Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77072>
- Eremić Dodić, J., Stojković, S., & Sedlak, O. (2023). Analysis of economic indicators and application of quantitative methods in planning of seeding. *Ratarstvo i Povrtarstvo*, 60(3), 73-79. <https://doi.org/10.5937/ratpov60-48285>
- Eugenija, S. (2022). Simulation and analysis of clothing production with FlexSim software. In S. Msahli & F. Debbabi (Eds.), *Advances in Applied Research on Textile and Materials - IX. Proceedings of the 9th International Conference of Applies Research on Textile and Materials (CIRATM 2020)*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-08842-1\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-031-08842-1_63)

- Hayat, U., Li, W., Bie, H., Liu, S., Guo, D., & Cao, K. (2024). An overview of post-harvest technological advances and ripening techniques for increasing peach fruit quality and shelf life. *Horticulturae*, 10(1), Article 4. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010004>
- Helmold, M. (2020). *Lean Management and Kaizen*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46981-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46981-8_10)
- Hering, S., Schäuble, N., Buck, T. M., Loretz, B., Rillmann, T., Stieneker, F., & Lehr, C.-M. (2021). Analysis and optimization of two film-coated tablet production processes by computer simulation: A case study. *Processes*, 9(1), Article 67. <https://doi.org/10.3390/pr9010067>
- Hernanz, V., Quiroga, S., Suárez, C., & Aguiño, J. E. (2024). Exploring the role of community organisations as environmental vulnerability insurance for cacao smallholders in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 485, Article 144371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144371>
- Huo, J., Shi, Z., Zhu, W., Xue, H., & Chen, X. (2022). A multi-scenario simulation and optimization of land use with a Markov-FLUS coupling model: A case study in Xiong'an New Area, China. *Sustainability*, 14(4), Article 2425. <https://doi.org/10.3390/su14042425>
- Kharraz, N., & Szabó, I. (2025). Hybrid plant growth: Integrating stochastic, empirical, and optimization models with machine learning for controlled environment agriculture. *Agronomy*, 15(1), Article 189. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010189>
- Khuwaileh, B. A., & Ababneh, A. Q. (2020). Probabilistic error upper bounds for verification and validation practices for nuclear reactor modelling and simulation. *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*, 14(1), 82-95. <https://doi.org/10.1504/IJNEST.2020.108807>
- Kienzlen, A., & Verl, A. (2024). Methods for localization in multi-scale material flow simulation for virtual commissioning. In *2024 4th International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICECCME62383.2024.10797016>
- Kondratenko, I., Gudoshnikova, Y., Kotova, O. & Agapitova, L. (2024) Sustainable practices in the agro-industrial complex: A pathway to enhanced ecological stewardship. *E3S Web Conf.*, 541, Article 03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454103001>.
- Kristiana, S. P. D., Asih, A. M. S., & Sudiarso, A. (2023). Designing simulation to improve production efficiency of batik industry. *Simulation & Gaming*, 54(6), 730-759. <https://doi.org/10.1177/10468781231205667>

- Liu, Z. (2025). Rural land sustainability development planning and use by considering land multifunction values: A case study of analysis and simulation. *Land Use Policy*, 150, Article 107455. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107455>
- Lorenc, A. (2024). Cross-docking layout optimization in FlexSim software based on cold chain 4PL company. *Sustainability*, 16(22), Article 9620. <https://doi.org/10.3390/su16229620>
- Lopera Molano, A. M. (2022). Social appropriation of ICT and agricultural associations in the rural sector: A systematic literature review 2010–2020. *Texto Livre*, 15, e37365. <https://doi.org/10.35699/1983-3652.2022.37365>
- Malik, A., Lamusa, A., Effendy, Rumangkang, O. E. C., & Muhardi. (2025). Important factors affecting production and marketing in a cocoa supply chain. *Australian Journal of Crop Science*, 19(2), 180-185. <https://doi.org/10.21475/ajcs.25.19.02.p259>
- Mujica Mota, M., El Makhoulfi, A., & Scala, P. (2019). On the logistics of cocoa supply chain in Côte d'Ivoire: Simulation-based analysis. *Computers & Industrial Engineering*, 137, Article 106034. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106034>
- Paulo, H., Vieira, M., Gonçalves, B. S., Pinto-Varela, T., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2022). Assessment of biomass supply chain design and planning using discrete-event simulation modeling. *Computer Aided Chemical Engineering*, 51(32), 967-972. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50162-4>
- Pelzer, E., Bonifazi, M., Soulié, M., Guichard, L., Quinio, M., Ballot, R., & Jeuffroy, M.-H. (2020). Participatory design of agronomic scenarios for the reintroduction of legumes into a French territory. *Agricultural Systems*, 184, Article 102893. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102893>
- Pérez, J. A. C., Revilla, J. A. D., De León, G. J. L., Galang, J. A. D. J., Ani, A. C., Pasi6n, V.-R. B. A., Miranda, C. B., Robielos, R. A. C., & Delfin, M. A. C. (2026). Dynamic simulation tool for the analysis of the effects of man–machine ratio on productivity of test manufacturing of a semiconductor company. In H. Florez, L. Rabelo & C. Diaz (Eds.), *Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 133-144). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-98235-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-98235-4_10)
- Poloczek, R. (2025). Analysis of material flow and resource utilization in production systems with the use of turntables. *Production Engineering Archives*, 31(1), 137-144. <https://doi.org/10.30657/pea.2025.31.13>
- Possik, J., Zacharewicz, G., Zouggar, A., & Vallespir, B. (2023). HLA-based time management and synchronization framework for lean manufacturing tools evaluation. *Simulation*, 99(4), 347-362. <https://doi.org/10.1177/00375497221132577>

- Quintero García, J. C., Castro Camacho, J. K., Rodríguez Polanco, L., & Criollo Nuñez, J. (2025). Development and validation of an inspection and compliance tool for sanitary requirements applied to cacao processing centers in the department of Huila. *Vitae*, 32(2), Article 358408. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v32n2a358408>
- Ramos-García, C., Roa, A. A. R., Gutiérrez, M. R., Morales, S. F., & Tamayo, A. M. R. (2024). Social appropriation of knowledge for disaster risk management: Lessons learned from an experience with communities in Cundinamarca, Colombia. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres*, 8(1), 234-253. <https://doi.org/10.55467/reder.v8i1.153>
- Rodríguez, L. P. M., & Sánchez, P. A. S. (2023) Social appropriation of knowledge applying the knowledge management methodology. Case study: San Miguel de Sema, Boyacá. *AG Management*, 1-13.
- Romero-Rodríguez, J. M., Ramírez-Montoya, M. S., Aznar-Díaz, I., & Hinojo-Lucena, F. J. (2020). Social appropriation of knowledge as a key factor for local development and open innovation: A systematic review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(2), Article 44. <https://doi.org/10.3390/joitmc6020044>
- Rushchitskaya, O., Kulikova, E., Kruzhkova, T., Kot, E., & Ruchkin, A. (2025). Innovative approaches to enhancing sustainability in agro-industrial complexes through renewable energy integration and precision agriculture technologies. *E3S Web of Conferences*, 614, Article 03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561403001>
- Sánchez Garavito, S. A. (2021). *Campesinado y multiculturalidad en Colombia: El caso del municipio de Leguízamo en el departamento del Putumayo* [Bachelor's thesis, Universidad Estatal Paulista "Julio de Mesquita Filho"]. UNESP Institutional Repository. <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/0d62c89d-234d-4724-8c9b-e3d319791df3/content>
- Savitri, Rangra, S., Monika, & Bhalla, T. C. (2021). Enzymes and Microbes in Agro-Processing. In D. K. Srivastava, A. K. Thakur, & P. K. Kumar (Eds.), *Agricultural Biotechnology: Latest Research and Trends*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2339-4\\_29](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2339-4_29)
- Sergeyeva, N. V. (2020). The Cost Planning and Cash Limits for Repair and Maintenance Work in the AIC. In A. Bogoviz (Eds.), *Complex Systems: Innovation and Sustainability in the Digital Age* (pp. 585-594). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44703-8\\_64](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44703-8_64)
- Sharma, B. B., Vaidya, P., Kumar, N, Tiwari, A, Bansal, S., Faruque M. R. I, & Al-Mugren K. S. (2025). Enhancing post-harvest sustainability in temperate crops through smart IoT-integrated indirect solar dryer. *Scientific Reports*, 15, Article 28608. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13499-x>

- Smirnova, E. A., & Postnova, M. V. (2020). Increasing labor productivity as the major line of agricultural industry development. International scientific-practical conference: Agriculture and food security: Technology, innovation, markets, human resources, (FIES 2019). *BIO Web of Conferences*, 17, Article 00207. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700207>
- Smith, N. T., Muller Spiti, J., Padley, J., & Davies, E (2024). Mapping simulation-based activities for health professionals in rural and remote contexts in high-income countries: a scoping review protocol. *JBI Evidence Synthesis*, 22(8). [https://journals.lww.com/jbisrir/fulltext/2024/08000/mapping\\_simulation\\_based\\_activities\\_for\\_health.11.aspx](https://journals.lww.com/jbisrir/fulltext/2024/08000/mapping_simulation_based_activities_for_health.11.aspx)
- Sreekar, C. H., Hari Krishna, K., & Vamsi Krishna, P. (2020). Decision-Making System for Accepting/Rejecting an Order in MTO Environment. In M. Shunmugam & M. Kanthababu (Eds.), *Advances in Simulation, Product Design and Development. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering* (pp. 437-450). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-32-9487-5\\_35](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9487-5_35)
- Turner, A. M. M., Grobbelaar, S. S., Salie, F., & Nieuwoudt, M. (2025). From idea to market in the local medical device value chain: A conceptual framework. *IEEE Engineering Management Review*, 53(2), 63-84. <https://doi.org/10.1109/EMR.2024.3409943>
- Wang, N., Liu, F., & Zhang, L. (2025). Mechanism and simulation analysis of cross-regional vegetable production and marketing docking in big cities based on evolutionary game. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, Article 1560865. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1560865>
- Wang, X., Liu, Y., He, Y., Li, N., Mu, H., & Bai, Y. (2020). Achieving manufacturing excellence through the integration of process planning change and data-driven simulation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1693(1), Article 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1693/1/012045>
- Wolff, A., & Knutas, A. (2023). Tangible data exploration: Creating card games for sensemaking. In *Proceedings of the 46th ICT and electronics convention (MIPRO 2023)* (pp. 50-55). IEEE. <https://doi.org/10.23919/MIPRO57284.2023.10159800>
- Yani, M., Machfud, Asrol, M., Hambali, E., Papilo, P., Mursidah, S., & Marimin, M. (2022). An adaptive fuzzy multi-criteria model for sustainability assessment of sugarcane agroindustry supply chain. *IEEE Access*, 10, 5497-5517. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3140519>
- Yu, Z., Zeng, Z., Zhuang, B., & He, F. (2025). Research on optimal planting scheme based on linear programming model. In *Proceedings of the 2025 international conference on*

*machine learning and neural networks* (MLNN 2025) (pp. 276-284). ACM. <https://doi.org/10.1145/3747227.3747271>

Zhdanov, V., Logacheva, E., Yarosh, V., & Ivashina, A. (2021). Optimisation of repair and maintenance costs for electrical equipment in agricultural enterprises. *BIO Web of Conferences*, 37, Article 00103. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213700103>

Zhu, G., Zhou, X., Yi, X., Xie, Q., Lou, Z., Shen, J., Wang, X., & Zhao, Y. (2021). Construction and evaluation of the typical technology pattern of farmer cooperatives for grain harvest-storage in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 37(10), 235-244. <https://www.aeeisp.com/nygxcb/en/article/doi/10.11975/j.issn.1002-6819.2021.10.028?viewType=citedby-info>

**CALIDAD  
Y MEDIO AMBIENTE**  

---

**Quality and Environment**



# VALORIZACIÓN DE VALVAS DE *ARGOPECTEN PURPURATUS* EN LA FORMULACIÓN DE JABÓN EXFOLIANTE PARA REDUCIR RESIDUOS EN PIURA

JOCELLYN NALLELY PEÑA JIMENEZ\*

<https://orcid.org/0000-0002-6950-3568>

Escuela Profesional de Ingeniería Industrial,  
Universidad César Vallejo, Perú

UBALDO IAIR TRELLES SALAZAR

<https://orcid.org/0000-0003-2840-6101>

Escuela Profesional de Ingeniería Industrial,  
Universidad César Vallejo, Perú

GABRIEL ERNESTO BORRERO CARRASCO

<https://orcid.org/0000-0001-5485-9927>

Escuela Profesional de Ingeniería Industrial,  
Universidad César Vallejo, Perú

Recibido: 22 de enero del 2026 / Aceptado: 16 de abril del 2026

Publicado: 15 de junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8332>

**RESUMEN.** La presente investigación contribuye al cumplimiento del objetivo de desarrollo sostenible 9 (industria, innovación e infraestructura), al promover tecnologías limpias e infraestructuras resilientes. El objetivo de este trabajo fue elaborar un jabón exfoliante mediante el proceso de saponificación a partir de aceite de oliva e hidróxido de sodio, empleando como insumo las valvas de conchas de abanico (*Argopecten purpuratus*) para reducir la acumulación de residuos orgánicos en Piura. Se desarrolló una investigación aplicada con enfoque cuantitativo y diseño cuasiexperimental. Se utilizaron de 30 a 40 kilogramos de valvas y participaron en este estudio 20 personas; el principal instrumento

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: [jpenaji@ucvvirtual.edu.pe](mailto:jpenaji@ucvvirtual.edu.pe); [utrelless@ucvvirtual.edu.pe](mailto:utrelless@ucvvirtual.edu.pe); [gborrero@ucv.edu.pe](mailto:gborrero@ucv.edu.pe)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

de medición fue la hoja de cálculo de proyección ambiental. Entre las 28 formulaciones preparadas, solamente las formulaciones C2H2R1 y C3H2R1 presentaron las mejores propiedades sensoriales. La producción anual proyectada fue de 9 096 000 unidades de jabón para el año 2025. El costo unitario del jabón fue S/ 4,86 y su precio de venta fue S/ 6,32, obteniéndose una relación beneficio/costo de 1,30, un VAN positivo de S/ 30 115 277,41 y una TIR de 32 %. Además, se evidenció una reducción estimada del 11 % en la acumulación de conchas en la zona de estudio, lo que demostró la viabilidad técnica, económica y ambiental del aprovechamiento del residuo al final del trabajo realizado.

PALABRAS CLAVE: desarrollo sostenible / jabón exfoliante / evaluación económica / impacto ambiental / reciclaje

## VALORIZATION OF ARGOPECTEN PURPURATUS SHELLS IN THE FORMULATION OF EXFOLIATING SOAP FOR WASTE REDUCTION IN PIURA

ABSTRACT. This research contributes to the achievement of SDG 9: Industry, Innovation, and Infrastructure by promoting clean technologies and resilient infrastructures. The objective of this work was to produce exfoliating soap through the saponification process using olive oil and sodium hydroxide, incorporating scallop shells (*Argopecten purpuratus*) as a raw material to reduce the accumulation of organic waste in Piura. An applied research study was conducted with a quantitative methodology and a quasi-experimental design. Between 30 and 40 kg of shells were used, and 20 participants were involved in the study, using an environmental projection spreadsheet as the main measurement instrument. Among the 28 formulations prepared, only formulations C2H2R1 and C3H2R1 exhibited the best sensory properties. For 2025, the projected annual production 2025 was 9 096 000 soap units. The unit cost of the soap was PEN 4,86, and its selling price was PEN 6,32, yielding a benefit-cost ratio of 1,30, a positive NPV of PEN 30 115 277,41, and an IRR of 32 %. Additionally, an estimated 11 % reduction in shell accumulation was observed in the study area, demonstrating the technical, economic, and environmental feasibility of waste valorization at the end of the work done.

KEYWORDS: sustainable development / exfoliating soap / economic evaluation / environmental impact / recycling

## INTRODUCCIÓN

La actividad acuícola peruana, en especial la vinculada a la producción de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*), origina volúmenes importantes de residuos sólidos, principalmente valvas. En el Perú, estas valvas representan una fracción significativa del peso total del organismo y generan problemas de disposición final, además de costos adicionales en el proceso productivo (Loayza Aguilar et al., 2023). A escala internacional, la literatura sobre gestión de residuos de conchas advierte que estos materiales aún suelen manejarse como desechos y, en muchos casos, son dispuestos como residuos domésticos o sometidos a incineración, por lo que su recolección organizada y valorización resultan necesarias para reducir su impacto ambiental (Topić Popović et al., 2023). Asimismo, en destinos costeros, la presencia de residuos marinos afecta la experiencia recreativa y la sostenibilidad turística, ya que disminuye la satisfacción de los visitantes y puede desincentivar la visita a playas afectadas por *litter* marino (Panwanitdumrong & Chen, 2022).

Montenegro et al. (2024) señalaron que los exoesqueletos de animales marinos, procedentes de actividades industriales como la pesca y la extracción de arena marina, pueden reutilizarse como una fuente rica en carbonato de calcio, lo que evidencia su potencial de aprovechamiento dentro de esquemas de valorización de residuos. Asimismo, las conchas marinas constituyen una de las fuentes naturales más concentradas de este mineral, con proporciones cercanas al 99 % de  $\text{CaCO}_3$ , lo que favorece su procesamiento para la obtención de nuevos productos y su incorporación en enfoques de economía circular. A escala global, Azarian y Sutapun (2022) refieren que millones de toneladas de residuos biogénicos de conchas son eliminadas anualmente en vertederos, lo que genera contaminación ambiental; por ello, su transformación en biomateriales de valor agregado constituye una alternativa ecoeficiente. En esa misma línea, Del Castillo Luis et al. (2023) sostienen que el carbonato de calcio obtenido de las conchas no es aprovechado en su máximo potencial, pues su uso suele restringirse a aplicaciones de bajo valor, pese a sus posibilidades de innovación industrial.

En el caso peruano, las valvas de concha de abanico han comenzado a ser aprovechadas en aplicaciones de valorización con fines ambientales e industriales. En esa línea, se han desarrollado *pellets* elaborados a partir de desechos de conchas de abanico y otros residuos hidrobiológicos para la remoción de metales pesados en agua, lo que evidencia el potencial de este subproducto en tecnologías de tratamiento hídrico (Ministerio de la Producción, 2020). Asimismo, Mauricio Villarrial y Farfán Córdova (2021) demostraron que la cal obtenida de conchas de abanico puede incorporarse al concreto estructural, destacando su aprovechamiento debido al alto contenido de calcio presente en la valva. Estos antecedentes muestran que las valvas de concha de abanico presentan condiciones favorables para su reutilización en procesos de valorización.

La región Piura reúne una proporción importante del procesamiento nacional de concha de abanico y presenta problemas recurrentes asociados a la acumulación de residuos. Desde el 2019, las autoridades locales vienen alertando sobre los efectos adversos observados en las zonas costeras de Sechura y Paita. En la bahía de Sechura, se ha reportado que la falta de infraestructura para la recolección y el escaso tratamiento de los residuos propiciaron su disposición incontrolada en espacios habilitados por la municipalidad, lo que ha generado riesgos ambientales y sanitarios asociados a la acumulación de materia orgánica y a la ausencia de control adecuado (Asociación Nacional de Fabricantes de Conservas de Pescados y Mariscos [Anfaco], 2020).

En este escenario, la presente investigación se vincula con el objetivo de desarrollo sostenible 9 (industria, innovación e infraestructura), orientado a impulsar tecnologías limpias, consolidar industrias sostenibles y promover infraestructuras resilientes. Desde esa perspectiva, la transformación de las valvas de concha de abanico en jabón exfoliante se plantea como una alternativa innovadora para valorizar residuos orgánicos, reducir los impactos ambientales y sanitarios derivados de su acumulación, e impulsar la creación de una microindustria local basada en los principios de economía circular.

Asimismo, la ONG Ayuda en Acción Perú (2023) reportó que cerca del 70 % de las conchas de abanico se desecha como residuo, mientras que el 30 % restante se procesa primariamente y se envía a otros centros para continuar su transformación y exportación. Este limitado nivel de aprovechamiento coincide con diagnósticos técnicos realizados en la bahía de Sechura, los cuales advierten una escasa o nula aplicación de técnicas de aprovechamiento de residuos de valvas vacías y partes blandas, así como la ausencia de una solución definitiva para su disposición final; aunque existen tecnologías para su valorización, estas requieren mayor promoción e implementación (Anfaco, 2020). En un plano más amplio, la literatura especializada señala que millones de toneladas de residuos biogénicos de conchas son eliminados anualmente en vertederos, por lo que su transformación en biomateriales de valor agregado constituye una alternativa ambiental y económicamente más sostenible (Azarian & Sutapun, 2022).

En este contexto, diversos estudios han evidenciado que los residuos marinos ricos en carbonato de calcio pueden ser aprovechados como insumos en productos cosméticos y de cuidado personal. Salsabila et al. (2021) desarrollaron jabones naturales a partir de subproductos de mariscos, obteniendo formulaciones estables y seguras para la piel. De manera similar, Sisodiya et al. (2024) demostraron que la incorporación de materiales minerales naturales en jabones mejora sus propiedades exfoliantes y dermatológicas. Por otro lado, Del Castillo Luis et al. (2023) señalaron que el carbonato de calcio biogénico obtenido de residuos de vieiras puede sustituir al carbonato de calcio inorgánico en diversas industrias peruanas, mientras que Mauricio Villarrial y Farfán Córdova (2021) demostraron el aprovechamiento de la cal de concha de abanico debido a su alto contenido de calcio.

En conjunto, estos antecedentes respaldan el potencial de las valvas de *Argopecten purpuratus* como materia prima para el desarrollo de productos con valor agregado, entre ellos formulaciones exfoliantes de interés ambiental y comercial.

Frente a esta problemática, se propone una alternativa sostenible e innovadora: reutilizar las valvas de concha de abanico para su transformación en jabón exfoliante. Esta alternativa permite reducir la contaminación, generar oportunidades económicas locales y fomentar la economía circular. De esta manera, la propuesta contribuye a la reducción de residuos en zonas costeras, la protección ambiental y la creación de un producto con valor agregado, alineado con los principios de sostenibilidad e innovación del objetivo 9.

El objetivo general de la presente investigación consistió en desarrollar un jabón exfoliante mediante la saponificación de aceite de oliva e hidróxido de sodio, utilizando como insumo valvas de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*), con la finalidad de disminuir la acumulación de residuos en Piura. A partir de este logro a alcanzar, se derivan objetivos específicos orientados a evaluar las operaciones más eficientes de transformación, las características físicoquímicas, microbiológicas y sensoriales del jabón, así como su viabilidad económica y ambiental. En este sentido, la investigación busca demostrar que la valorización de residuos acuícolas puede generar beneficios sociales, ambientales y económicos para la región.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- 1.1. Determinar las operaciones más eficientes para el tratamiento previo de la materia prima y la transformación de las valvas de *Argopecten purpuratus* en la elaboración del jabón exfoliante.
- 1.2. Determinar las características sensoriales del jabón exfoliante y evaluar su aceptación frente a un producto comercial de referencia.
- 1.3. Evaluar las características físicoquímicas y microbiológicas de los jabones elaborados, verificando su cumplimiento con la normativa vigente (NTP 319.073:1978).
- 1.4. Analizar la relación beneficio/costo y los efectos ambientales del proyecto para determinar su viabilidad económica y sostenibilidad.

## METODOLOGÍA

La investigación correspondió a un estudio aplicado, ya que estuvo orientada a plantear una respuesta práctica mediante la elaboración de un jabón exfoliante a base de valvas de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*), con la finalidad de disminuir la acumulación de residuos marinos en las zonas costeras de Piura. El enfoque adoptado fue cuantitativo, debido a que se trabajó con la recopilación y el análisis de datos numéricos que permitieron valorar la disponibilidad de la materia prima y el potencial de uso de las

valvas en la formulación del jabón exfoliante. Para ello, se consideraron variables como el peso del residuo reutilizado, la cantidad de unidades obtenidas, los costos de producción, las propiedades fisicoquímicas del jabón, especialmente el pH y la dureza, así como la disminución del volumen de residuos. Asimismo, el diseño fue cuasiexperimental, puesto que se aplicó una intervención controlada en el proceso de elaboración del jabón con el propósito de evaluar su efecto tanto en el aprovechamiento de los residuos como en las características finales del producto.

La cantidad de aceite de oliva utilizado en cada tratamiento experimental fue constante, se emplearon 20 gramos de aceite de oliva por formulación. Se ha tomado en cuenta que el aceite de oliva tiene una densidad menor que el agua, por lo que la equivalencia de volumen en mililitros (20 mL) no corresponde a la misma cantidad en gramos. Por lo tanto, se utilizaron 20 gramos de aceite de oliva como base constante para la formulación del jabón exfoliante en todos los tratamientos.

### Proceso de elaboración del jabón

Tal como se observa en la Figura 1, el proceso productivo comprendió el pretratamiento de las valvas (*Argopecten purpuratus*) mediante limpieza con agua potable a presión, seguida de una desinfección por inmersión en hipoclorito de sodio al 5 % durante 5 minutos, enjuague con agua destilada, secado a temperatura ambiente por aproximadamente 2 horas, y posterior trituración y molienda hasta obtener un tamaño de partículas de 0,3-0,4 mm. La elección de este rango se sustentó en antecedentes que reportan partículas de dimensión comparable en jabones exfoliantes elaborados con abrasivos naturales, dentro de los cuales se verificó un desempeño adecuado en formulaciones cosméticas (Pantoja Pena et al., 2021). La saponificación se realizó a 80 °C empleando aceite de oliva (20 mL) y una solución alcalina de hidróxido de sodio (NaOH), evaluándose tres niveles de concentración: H1 = 9 g NaOH/50 mL H<sub>2</sub>O, H2 = 10 g NaOH/50 mL H<sub>2</sub>O y H3 = 11 g NaOH/50 mL H<sub>2</sub>O. Al final de la reacción, se adicionó una solución de NaCl como agente precipitante y se incorporó glicerina como aditivo humectante/emoliente, con el fin de mejorar la suavidad, la retención de humedad y la sensación en la piel. El producto se filtra, se lava con agua destilada y luego se coloca dentro de un molde, donde se incorpora el polvo de valvas como agente exfoliante en tres niveles: C1 = 0,5 % (1,5 g), C2 = 2 % (6 g) y C3 = 3 % (9 g) por unidad experimental, con la finalidad de proceder a la solidificación del jabón durante 24 horas a temperatura ambiente. Finalmente, se retira el jabón del molde y se empaqueta. Las variables concentración de NaOH y carga de valvas (masa/% incorporado) se establecieron como factores experimentales (ver la Tabla 1), lo que permitió generar 27 tratamientos más un grupo control comercial. Se obtienen muestras de jabón para las evaluaciones sensoriales, fisicoquímicas y microbiológicas.

**Figura 1**

*Diagrama de operaciones de proceso del jabón*



**Tabla 1**

*Tratamientos experimentales realizados*

Porcentaje de valvas (% p/p) (Factor 1)	Concentración de NaOH (g NaOH/mL H <sub>2</sub> O) (Factor 2)	Repeticiones	Fórmula de jabón
C <sub>1</sub> = 0,5 %	H <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> H <sub>1</sub> R <sub>1</sub>
			C <sub>2</sub> H <sub>1</sub> R <sub>1</sub>
			C <sub>3</sub> H <sub>1</sub> R <sub>1</sub>
C <sub>2</sub> = 2 %	H <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> H <sub>2</sub> R <sub>1</sub>
	H <sub>3</sub>		C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> R <sub>1</sub>
	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> R <sub>1</sub>		
C <sub>3</sub> = 3 %	H <sub>3</sub>	R <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> H <sub>3</sub> R <sub>1</sub>
			C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> R <sub>1</sub>
			C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> R <sub>1</sub>

(continúa)

(continuación)

Porcentaje de valvas (% p/p) (Factor 1)	Concentración de NaOH (g NaOH/mL H <sub>2</sub> O) (Factor 2)	Repeticiones	Fórmula de jabón
C <sub>1</sub> = 0,5 %	H <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> H <sub>1</sub> R <sub>2</sub>
			C <sub>2</sub> H <sub>1</sub> R <sub>2</sub>
			C <sub>3</sub> H <sub>1</sub> R <sub>2</sub>
C <sub>2</sub> = 2 %	H <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> H <sub>2</sub> R <sub>2</sub>
	H <sub>2</sub>		C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> R <sub>2</sub>
	H <sub>3</sub>		C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> R <sub>2</sub>
C <sub>3</sub> = 3 %	H <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> H <sub>3</sub> R <sub>2</sub>
			C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> R <sub>2</sub>
			C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> R <sub>2</sub>
C <sub>1</sub> = 0,5 %	H <sub>1</sub>	R <sub>3</sub>	C <sub>1</sub> H <sub>1</sub> R <sub>3</sub>
			C <sub>2</sub> H <sub>1</sub> R <sub>3</sub>
			C <sub>3</sub> H <sub>1</sub> R <sub>3</sub>
C <sub>2</sub> = 2 %	H <sub>1</sub>	R <sub>3</sub>	C <sub>1</sub> H <sub>2</sub> R <sub>3</sub>
	H <sub>2</sub>		C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> R <sub>3</sub>
	H <sub>3</sub>		C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> R <sub>3</sub>
C <sub>3</sub> = 3 %	H <sub>1</sub>	R <sub>3</sub>	C <sub>1</sub> H <sub>3</sub> R <sub>3</sub>
			C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> R <sub>3</sub>
			C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> R <sub>3</sub>
Grupo de control			GC1

Nota. Para el factor 2, se consideraron tres niveles de concentración: H1 = 9 g NaOH/50 mL H<sub>2</sub>O, H2 = 10 g NaOH/50 mL H<sub>2</sub>O y H3 = 11 g NaOH/50 mL H<sub>2</sub>O. Cada combinación experimental fue evaluada en tres repeticiones (R1, R2 y R3), además de un grupo de control comercial.

La evaluación sensorial fue realizada por 20 panelistas entre hombres y mujeres, quienes valoraron un total de 28 muestras (27 tratamientos experimentales y un control comercial) utilizando una escala hedónica de cuatro puntos (1 = poco aceptable; 2 = aceptable; 3 = bueno; 4 = muy aceptable). Los atributos evaluados fueron color, olor, textura, formación de espuma, poder exfoliante, sensación durante el enjuague y percepción en la piel.

Las pruebas se realizaron en condiciones controladas, garantizando que cada panelista evaluara las muestras de manera individual. Los datos fueron registrados en fichas de evaluación sensorial y, posteriormente, fueron procesados mediante estadística descriptiva (frecuencias y promedios).

La preparación del jabón exfoliante se realizó inicialmente a pequeña escala en un ambiente controlado, con la finalidad de ajustar las cantidades de materia prima e insumos

y controlar el pH. Luego, el proceso de elaboración del producto final (jabón con polvo de valvas como ingrediente exfoliante) se desarrolló en el Laboratorio de Procesos Industriales de la Escuela Profesional de Ingeniería Industrial de la Universidad César Vallejo, sede Piura, donde se aseguraron condiciones adecuadas de manufactura y control de calidad.

**Tabla 2**

*Esquema del diseño cuasiexperimental*

Grupo	Pretest	Tratamiento (X)	Postest (O)
GE	A	X	O1
GC	A	–	O2

*Nota.* GE corresponde al grupo experimental y GC al grupo control; A representa el pretest; X indica la aplicación del tratamiento, consistente en la elaboración del jabón exfoliante con valvas de *Argopecten purpuratus*; O1 y O2 señalan el postest del grupo experimental y del grupo control, respectivamente; el símbolo – indica ausencia de tratamiento.

El alcance de la investigación fue descriptivo y proyectivo, debido a que, además de evidenciar la acumulación y disposición inadecuada de residuos de valvas de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en zonas costeras de Piura, se propuso una alternativa sostenible para su aprovechamiento. Se elaboró un prototipo de jabón a pequeña escala en el laboratorio, para luego evaluar sus propiedades fisicoquímicas, sensoriales y microbiológicas. A través de encuestas y análisis teóricos se evaluaron la aceptación del producto, la demanda potencial y sus efectos ambientales y económicos, considerando para ello la relación beneficio/costo.

Las variables de estudio fueron las siguientes:

- Variable independiente: elaboración de jabón exfoliante utilizando valvas de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*)
- Variable dependiente: disminución de residuos de valvas presentes en zonas costeras

Ambas variables se operacionalizaron en dimensiones que incluyeron propiedades fisicoquímicas, aceptación sensorial, volumen de residuos valorizados e indicadores de impacto ambiental.

La población de estudio estuvo integrada por las valvas de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) generadas como residuo en las zonas industriales de Paita y Sechura, en Piura, durante el periodo evaluado, así como por el personal relacionado con su manejo y disposición.

Los criterios de inclusión consideraron valvas en buen estado, recolectadas en zonas formales y sin contaminación peligrosa (p. ej., presencia de hidrocarburos/aceites, pinturas

o solventes, residuos químicos, material biológico en descomposición o mezcla con residuos hospitalarios o industriales). Para la obtención del polvo de valvas, estas fueron lavadas, secadas y trituradas hasta obtener partículas finas, las cuales fueron sometidas a un proceso de tamizaje para asegurar una distribución adecuada del tamaño de las partículas. Adicionalmente, con el fin de reducir el riesgo de presencia significativa de sustancias tóxicas y mantener la inocuidad del insumo, en esta etapa se aplicaron criterios metodológicos de selección basados en la trazabilidad del origen, la inspección visual del material y su limpieza y desinfección previa. Este control resultó pertinente debido a que los bivalvos pueden bioacumular metales pesados, especialmente cadmio (Cd), en función de la calidad del agua, por lo que su vigilancia constituye un aspecto relevante de seguridad (Lin et al., 2021).

Asimismo, se reconoce que las conchas de abanico (matriz carbonatada biogénica) pueden interactuar con metales pesados y actuar como bioindicadores, lo que refuerza la pertinencia del tamizaje (Chenet et al., 2024). En caso de disponer de análisis instrumental, se recomienda cuantificar Pb, Cd y As mediante ICP-MS, técnica validada para la determinación de trazas metálicas en productos cosméticos terminados (ISO 21392:2021). Si no se cuenta con dichos ensayos, esta limitación se declara explícitamente y se plantea como trabajo futuro. Dado que no existe un registro oficial unificado del volumen total generado, la población de valvas se consideró no finita/indeterminada y se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia.

La muestra del insumo se estableció en aproximadamente 30 a 40 kilogramos de valvas, las cuales fueron recolectadas durante 30 días para la elaboración experimental, y participaron 20 personas para las pruebas de aceptación del jabón. Se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando la disponibilidad de materiales y participantes (Arias González & Covinos Gallardo, 2021).

Para la recolección de datos se empleó la observación estructurada del proceso productivo, encuestas tipo Likert para medir la aceptación del producto y análisis de laboratorio para determinar parámetros fisicoquímicos y microbiológicos conforme a la NTP 319.073:1978 (Instituto Nacional de Calidad, 2017).

Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos se realizaron únicamente a las muestras experimentales que obtuvieron mayor aceptación sensorial (C2H2R1 y C3H2R1).

Las pruebas fisicoquímicas y microbiológicas se realizaron en un laboratorio acreditado, siguiendo los procedimientos de la NTP 319.073:1978 (versión vigente). Para el análisis fisicoquímico, la humedad se determinó mediante método gravimétrico por secado hasta peso constante; el pH se midió en una solución acuosa del jabón mediante potenciometría (pH-metría); y el índice de espuma se evaluó mediante ensayo de formación/estabilidad de espuma establecido en la norma técnica. En los ensayos

microbiológicos, el recuento de aerobios mesófilos, mohos y levaduras se efectuó por recuento en placa (UFC/g), mientras que la *Escherichia coli* se determinó por el método del número más probable (NMP/g); asimismo, la detección y recuento de *Staphylococcus aureus* se realizó mediante el método microbiológico selectivo según los lineamientos normativos. Los resultados obtenidos se compararon con los límites establecidos en la normativa aplicable para verificar su conformidad.

Los instrumentos de medición empleados fueron la ficha de transformación productiva, la lista de cotejo técnica, la ficha de resultados de laboratorio, el cuestionario de aceptación, la encuesta de mercado, la hoja de cálculo ambiental y la hoja financiera.

El análisis de datos comprendió el registro sistemático de los resultados experimentales y su procesamiento mediante estadística descriptiva y análisis comparativo. Para la evaluación sensorial se aplicaron pruebas de normalidad y, debido al incumplimiento del supuesto de normalidad, se recurrió a una prueba no paramétrica, específicamente Kruskal-Wallis, para identificar diferencias significativas entre los tratamientos. De igual forma, la información económica fue evaluada mediante indicadores de rentabilidad, entre ellos beneficio/costo (B/C), valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR).

Durante todo el proceso, se respetaron los principios éticos de investigación, garantizando la transparencia, honestidad, objetividad y respeto hacia las personas, el entorno y la propiedad intelectual.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos permiten analizar tanto la factibilidad técnica y económica del proceso, como su impacto ambiental y sensorial. Las valvas recolectadas se caracterizaron por ser un material predominantemente mineral, compuesto principalmente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) biogénico. Revisiones recientes sobre valvas de moluscos reportan contenidos de  $\text{CaCO}_3$  entre 94 % y 100 %, según la especie y la fase mineral predominante, lo que respalda su aprovechamiento como materia prima calcárea de valor agregado (Del Castillo Luis et al., 2023). Esta composición sustenta su potencial aplicación como agente exfoliante natural en formulaciones cosméticas. Su morfología, coloración y textura se conservaron adecuadamente durante el proceso de acondicionamiento, evidenciando la posibilidad de reutilizarlas sin perder sus características físicas de interés para la formulación.

### Evaluación sensorial

Los resultados de la evaluación sensorial evidenciaron diferencias perceptibles entre las formulaciones experimentales, principalmente asociadas a la carga de valvas (% p/p respecto a la masa total del jabón de 100 gramos) y a la concentración de hidróxido de

sodio (NaOH) empleada en la saponificación. El tratamiento C2H2R1, correspondiente a una formulación con 2 % de valvas (2 gramos por barra de 100 gramos) y 10 gramos de NaOH por 50 mililitros de agua, obtuvo el mayor puntaje global, alcanzando 535 puntos, mientras que el jabón comercial control (GC1) registró 484 puntos.

Es importante señalar que el aceite de oliva se mantuvo constante en todos los tratamientos (20 gramos por unidad experimental), por lo que no constituyó factor experimental. Las diferencias observadas en la percepción sensorial se atribuyen exclusivamente a las variaciones en la concentración del reactivo alcalino y en la carga de material exfoliante incorporado.

Los puntajes obtenidos para cada atributo evaluado se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Puntajes obtenidos en la evaluación sensorial de las formulaciones de jabón exfoliante*

	Apariencia	Color	Olor	Textura	Espuma	Exfoliación	Sensación al enjuagar	Sensación en la piel	TOTAL
C1H1R1	54	54	55	43	59	54	56	44	419
C1H1R2	54	54	55	43	59	54	56	44	419
C1H1R3	54	54	55	43	59	54	56	44	419
C1H2R1	58	58	70	45	59	54	70	36	450
C1H2R2	58	58	70	45	59	54	70	36	450
C1H2R3	58	54	55	43	59	54	56	44	423
C1H3R1	59	55	57	53	45	53	58	53	433
C1H3R2	59	55	57	53	45	53	58	53	433
C1H3R3	59	55	57	53	45	53	58	53	433
C2H1R1	42	40	43	41	43	41	44	44	338
C2H1R2	42	40	43	41	43	41	44	44	338
C2H1R3	42	40	43	41	43	41	44	44	338
C2H2R1	63	74	74	74	51	62	75	62	535
C2H2R2	63	74	74	74	51	62	75	62	535
C2H2R3	63	74	74	74	51	62	75	62	535
C2H3R1	58	57	42	56	69	57	56	51	446
C2H3R2	58	57	42	56	69	57	56	51	446
C2H3R3	58	57	42	56	69	57	56	51	446
C3H1R1	45	55	45	55	46	58	44	56	404
C3H1R2	45	55	45	55	46	58	44	56	404
C3H1R3	45	55	45	55	46	58	44	56	404
C3H2R1	62	61	61	61	75	60	63	58	501
C3H2R2	62	61	61	61	75	60	63	58	501

(continúa)

(continuación)

	Apariencia	Color	Olor	Textura	Espuma	Exfoliación	Sensación al enjuagar	Sensación en la piel	TOTAL
C3H2R3	62	61	61	61	75	60	63	58	501
C3H3R1	70	57	57	56	69	56	70	50	485
C3H3R2	70	57	57	56	69	56	70	50	485
C3H3R3	70	57	57	56	69	56	70	50	485
GC1	62	61	59	60	65	59	63	55	484

Nota. Resultados derivados de la tesis de pregrado no publicada de Peña Jiménez y Trelles Salazar (2025).

Para el análisis sensorial se formularon las siguientes hipótesis estadísticas:  $H_0$ , que los datos presentan una distribución normal; y  $H_1$ , que no presentan una distribución normal. El criterio de decisión se estableció a partir del nivel de significancia ( $p$ ): cuando  $p < 0,05$  se rechaza  $H_0$  y se acepta  $H_1$ ; en cambio, si  $p \geq 0,05$ , no se rechaza  $H_0$ . Con base en ello, se aplicó la prueba de normalidad y sus resultados se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4**

Resultados de la prueba de normalidad aplicada a las respuestas de la encuesta

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Apariencia	0,301	560	0,000	0,784	560	0,000
Color	0,355	560	0,000	0,783	560	0,000
Olor	0,238	560	0,000	0,860	560	0,000
Textura	0,279	560	0,000	0,845	560	0,000
Espuma	0,270	560	0,000	0,775	560	0,000
Exfoliación	0,388	560	0,000	0,713	560	0,000
Sensación_al_enjuagar	0,227	560	0,000	0,810	560	0,000
Sensación_en_la_piel	0,234	560	0,000	0,874	560	0,000

Nota. a: Corrección de significación de Lilliefors. gl: grados de libertad calculados en función del tamaño muestral ( $n = 560$ ). Sig.: nivel de significancia estadística (valor  $p$ ), calculado en SPSS mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors y de Shapiro-Wilk. Resultados derivados de la tesis de pregrado no publicada de Peña Jiménez y Trelles Salazar (2025).

El tamaño muestral ( $n$ ) considerado para cada atributo sensorial fue 560 observaciones, valor obtenido a partir de la evaluación de 28 muestras (27 tratamientos experimentales y un control comercial) realizado por 20 panelistas ( $28 \times 20 = 560$ ). Dado que el tamaño de muestra es mayor a 50, se consideró como referencia principal la prueba de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors, debido a que es la más recomendada para muestras de mayor tamaño.

Los resultados mostraron valores de significancia (p) inferiores a 0,05 en todas las variables analizadas, por lo que se rechazó la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se determinó que los datos no seguían una distribución normal. En consecuencia, el análisis estadístico se realizó mediante métodos no paramétricos. Considerando que se compararon más de tres grupos independientes (27 tratamientos experimentales y un control), se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, apropiada para identificar diferencias significativas entre varios grupos cuando no se cumple el supuesto de normalidad.

Se plantearon las siguientes hipótesis:

$H_0$ : No existen diferencias significativas entre los jabones respecto a sus características sensoriales.

$H_1$ : Existen diferencias significativas entre los jabones respecto a sus características sensoriales.

El criterio de decisión fue el siguiente: si  $p < 0,05$  se rechaza  $H_0$ ; si  $p \geq 0,05$  no se rechaza  $H_0$ . Los resultados derivados de la prueba de Kruskal-Wallis se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis aplicada a los atributos sensoriales*

	Estadísticos de prueba <sup>ab</sup>							
	Apariencia	Color	Olor	Textura	Espuma	Exfoliación	Sensación_ alEnjuagar	Sensación_ en_la_piel
H de Kruskal-Wallis	232,051	240,888	256,375	247,336	244,126	161,562	268,582	115,082
gl	27	27	27	27	27	27	27	27
Sig. asintótica	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

*Nota.* a: prueba de Kruskal Wallis. b: variable de agrupación - jabones experimentales. Resultados derivados de la tesis de pregrado no publicada de Peña Jiménez y Trelles Salazar (2025).

La significancia estadística (p) fue  $\leq 0,05$  en todas las propiedades evaluadas, lo que evidencia diferencias significativas en la percepción sensorial de los jabones experimentales. A partir de este resultado, se compararon los puntajes asignados por los panelistas con el propósito de identificar la muestra experimental con mayor nivel de aceptación.

## Evaluación fisicoquímicas y microbiológicas

Los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras seleccionadas se presentan en las Tablas 6 y 7. Ambas formulaciones cumplieron con los requisitos establecidos en la NTP 319.073:1978. La muestra C2H2R1 presentó un valor de pH de 10,12, mientras que la muestra C3H2R1 registró un valor de pH de 10,48, ambos valores se encuentran dentro del límite máximo permitido (10,50). En cuanto a la humedad de estas muestras, los valores obtenidos fueron 13,42 % y 12,32 %, respectivamente.

Los resultados microbiológicos (ver la Tabla 8) evidencian ausencia de contaminación significativa, ya que todos los parámetros analizados se encontraron por debajo de los límites establecidos, lo que garantizó la inocuidad del producto.

**Tabla 6**

*Resultados fisicoquímicos del jabón C2H2R1*

Parámetro	Unidad	Resultado	Requisito*	Conclusión
Humedad	%	13,42	Máx. 30	CONFORME
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	10,12	Máx. 10,50	CONFORME
Índice de espuma	%	1,70		

Nota. \* Requisitos establecidos según la Norma Técnica Peruana NTP 319.073:1978. Resultados analíticos emitidos por Laboratorio ELAP (comunicación personal, 2025), derivados de la tesis de pregrado no publicada de Peña Jiménez y Trelles Salazar (2025).

**Tabla 7**

*Resultados fisicoquímicos del jabón C3H2R1*

Parámetro	Unidad	Resultado	Requisito*	Conclusión
Humedad	%	12,32	Máx. 30	CONFORME
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	10,48	Máx. 10,50	CONFORME
Índice de espuma	%	1,96		

Nota. \* Requisitos establecidos según la Norma Técnica Peruana NTP 319.073:1978. Resultados analíticos emitidos por Laboratorio ELAP (comunicación personal, 2025), derivados de la tesis de pregrado no publicada de Peña Jiménez y Trelles Salazar (2025).

**Tabla 8**

*Resultados microbiológicos de los jabones C2H2R1 y C3H2R1*

Parámetro	Unidad	Resultado
Recuento de aerobios mesófilos	UFC/g	< 10
Recuento de <i>Escherichia coli</i>	NMP/g	< 3

(continúa)

(continuación)

Parámetro	Unidad	Resultado
Recuento de mohos	UFC/g	< 10
Recuento de levaduras	UFC/g	< 10
Recuento de <i>Staphylococcus aureus</i>	UFC/g	< 10

Nota. Resultados analíticos emitidos por Laboratorio ELAP (comunicación personal, 2025), derivados de la tesis de pregrado no publicada de Peña Jiménez y Trelles Salazar (2025).

A partir del análisis de los ensayos sensoriales, fisicoquímicos y microbiológicos, se determinó que la muestra C2H2R1 fue la formulación experimental con mejor desempeño. Si bien C2H2R1 y C3H2R1 mostraron resultados semejantes en la evaluación sensorial, con una aceptable valoración por parte de los panelistas, y ambas cumplieron con los parámetros microbiológicos exigidos, la diferencia principal se evidenció en el análisis fisicoquímico. En cuanto al valor del pH de la muestra C2H2R1, esta registró un valor de 10,12, mientras que la muestra C3H2R1 alcanzó un valor de 10,48. Ambos valores se encuentran dentro del límite máximo permitido (10,50); sin embargo, la muestra C2H2R1 presenta un pH más cercano a los niveles recomendados para productos cosméticos alcalinos, lo que sugiere una mejor compatibilidad cutánea.

Respecto al índice de espuma, C3H2R1 presentó un valor ligeramente superior (1,96 %) en comparación con C2H2R1 (1,70 %). No obstante, esta diferencia no se considera determinante en la selección final, debido a que ambos valores se encuentran dentro de rangos funcionales aceptables y la evaluación sensorial del atributo espuma mostró mayor preferencia hacia la formulación C2H2R1. Por ello, considerando el equilibrio integral entre aceptación sensorial, estabilidad fisicoquímica (particularmente el pH), adecuado comportamiento espumante y conformidad microbiológica, la muestra C2H2R1 fue seleccionada como la mejor formulación experimental obtenida.

### Relación beneficio/costo y su impacto ambiental

El análisis financiero evidenció que la producción de jabón exfoliante a base de valvas de concha de abanico es económicamente viable. La relación beneficio/costo obtenido en la Tabla 9 se mantiene en 1,30 durante el periodo proyectado (2025-2038), lo que significa que por cada sol invertido se genera un retorno de S/ 1,30. Además, los ingresos anuales proyectados superan los costos de producción, lo que refleja un margen favorable de ganancia bajo los supuestos de precios y producción considerados. Las unidades proyectadas a vender por año se estimaron a partir de los resultados de la encuesta de intención de compra y la frecuencia promedio mensual de adquisición del producto, extrapolados a un periodo anual.

**Tabla 9**

*Relación beneficio/costo proyectado para la producción de jabón*

ANÁLISIS BENEFICIO/COSTO				
		- Costo unitario promedio de producción (S/)	4,86	
		- Precio unitario de venta proyectado (S/)	6,32	
Año	Unidades proyectadas a vender por un año	Costo total (S/)	Ingreso total (S/)	Relación B/C
2025	9 096 000	44 206 560	57 486 720	1,30
2026	9 312 000	45 256 320	58 851 840	1,30
2027	9 540 000	46 364 400	60 292 800	1,30
2028	9 780 000	47 530 800	61 809 600	1,30
2029	10 020 000	48 697 200	63 326 400	1,30
2030	10 260 000	49 863 600	64 843 200	1,30
2031	10 500 000	51 030 000	66 360 000	1,30
2032	10 740 000	52 196 400	67 876 800	1,30
2033	10 980 000	53 362 800	69 393 600	1,30
2034	11 220 000	54 529 200	70 910 400	1,30
2035	11 460 000	55 695 600	72 427 200	1,30
2036	11 700 000	56 862 000	73 944 000	1,30
2037	11 940 000	58 028 400	75 460 800	1,30
2038	12 180 000	59 194 800	76 977 600	1,30

*Nota.* Resultados derivados de la tesis de pregrado no publicada de Peña Jiménez y Trelles Salazar (2025).

Los resultados evidencian que la relación beneficio/costo se mantiene en 1,30 a lo largo del periodo proyectado (2025-2038), lo que indica que cada sol invertido genera un retorno de S/ 1,30. Este comportamiento respalda la viabilidad económica del proyecto bajo los supuestos de precios y producción establecidos.

Con base en la información previamente obtenida sobre la cantidad de jabón producida por año y el número de valvas empleadas por unidad, se elaboró la Tabla 10, donde se detalla la cantidad de valvas utilizadas en la producción de jabón durante los cinco años de evaluación.

### **Evaluación financiera (VAN y TIR)**

Con la finalidad de determinar la viabilidad financiera del proyecto, se calcularon los indicadores VAN y TIR, a partir de los flujos de caja proyectados para el periodo 2025-2038.

El VAN calculado fue de S/ 30 115 277,41, resultado que indica que el proyecto genera valor económico y supera la inversión inicial actualizada. Asimismo, la TIR alcanzó 32 %, valor superior a la tasa de descuento considerada, lo que respalda la viabilidad financiera y el atractivo del proyecto para su implementación. Estos resultados confirman que la producción del jabón exfoliante no solo es técnica y ambientalmente viable, sino también económicamente sostenible en el largo plazo.

### Evaluación ambiental

A partir de las proyecciones anuales de producción de jabón y del rendimiento promedio obtenido (32,05 gramos de jabón por kilogramo de valva), se estimó la cantidad total de valvas reutilizadas durante el periodo de evaluación. En la Tabla 10, se presenta la relación entre el peso de valvas empleadas y el volumen de jabón producido.

**Tabla 10**

*Correspondencia entre la cantidad de jabón producido y las valvas empleadas*

N.º	Peso de valvas utilizadas (kg)	Peso de jabón producido (kg)	Relación de peso de jabón/peso de valvas
1	28 379,52	909 600,00	32,05
2	29 053,44	931 200,00	32,05
3	29 764,80	954 000,00	32,05
4	30 513,60	978 000,00	32,05
5	31 262,40	1 002 000,00	32,05

*Nota.* Resultados derivados de la tesis de pregrado no publicada de Peña Jiménez y Trelles Salazar (2025).

A partir de la Tabla 10, rendimiento promedio determinado (32,05 g jabón/kg de valva), se elaboró la proyección ambiental presentada en la Tabla 11. El porcentaje de disminución teórica de la acumulación se estimó considerando como línea base la cantidad total anual de residuos de valvas generados en las zonas industriales de estudio. El cálculo se realizó mediante la siguiente expresión:

$$\% \text{ Disminución} = \left( \frac{\text{Cantidad de valvas reutilizadas}}{\text{Cantidad total estimada de valvas generadas anualmente}} \right) \times 100$$

Para el año 2025, al reutilizarse 28 379,52 kilogramos de valvas, se obtuvo una reducción aproximada del 11 % respecto al total anual estimado de residuos generados en dicho periodo.

**Tabla 11***Estimación de la disminución de residuos de valvas*

IMPACTO ESTIMADO				
- Rendimiento medio de jabón (g de jabón/kg de valva):				32,05
- Densidad promedio de las valvas (kg/m <sup>3</sup> ):				600
Estimación de reducción de residuos y acumulación				
Año	Cantidad de valvas recolectadas por año (kg)	Volumen reducido (m <sup>3</sup> )	Jabón producido (kg)	% de reducción teórica de la acumulación
2025	28 379,52	47,30	909 600,00	11

Nota. Resultados derivados de la tesis de pregrado no publicada de Peña Jiménez y Trelles Salazar (2025).

## DISCUSIÓN

El primer objetivo específico permitió identificar las operaciones más adecuadas a desarrollar para el tratamiento previo de la materia prima, proceso de saponificación y de transformación de las valvas de concha de abanico como materia prima en la elaboración de jabones exfoliantes, lo que resultó esencial para asegurar la calidad del producto final. Las fases de recepción, acondicionamiento, molienda e incorporación del material pulverizado al jabón demostraron ser determinantes para garantizar un proceso eficiente. La etapa de recepción y acopio destacó por su importancia en la selección de valvas en buen estado, libres de contaminación visible y aptas para su posterior procesamiento. El pretratamiento de las valvas constituye una etapa clave para su posterior revalorización, debido a que permite acondicionar adecuadamente el material, mejorar la calidad del insumo obtenido y disminuir los posibles impactos ambientales asociados a su manejo y aprovechamiento. De manera similar, Zayed et al. (2024) afirman que una manipulación adecuada de residuos orgánicos antes de su transformación tiene efectos directos en la eficiencia del proceso productivo y en las propiedades del producto final. En el presente estudio, la implementación de una limpieza y desinfección inicial permitió asegurar el cumplimiento de los estándares mínimos para su incorporación en el jabón obtenido con fines comerciales. Asimismo, el control de las variables críticas del proceso, como la temperatura durante la mezcla y el proceso de saponificación, a 80 °C, coincide con los aportes de Salsabila et al. (2021), quienes destacan que la estabilidad térmica de los componentes empleados influye en la calidad y consistencia del jabón. El mantenimiento de temperaturas adecuadas en las etapas de mezclado permitió obtener una textura uniforme y una buena formación de espuma, elementos claves en productos cosméticos de uso diario.

El uso de valvas molidas en concentraciones de 0,5 %, 2,0 % y 3,0 % con respecto al peso total del jabón (100 gramos por unidad experimental) está de acuerdo con lo

expuesto por Sisodiya et al. (2024), quienes demostraron que el uso de biomateriales naturales aporta beneficios funcionales adicionales, como propiedades exfoliantes y dermatoprotectoras. En este estudio, las partículas minerales, principalmente el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), presentes en las valvas, aportaron una textura fina y homogénea, dando lugar a un exfoliante natural que no altera la integridad de la piel. La exfoliación fue regulada mediante el control de la granulometría de las partículas (0,3-0,4 mm), lo que permitió una acción mecánica uniforme sin generar abrasión excesiva. Estos hallazgos del primer objetivo confirman que los residuos marinos pueden ser transformados mediante un proceso técnicamente viable, ambientalmente responsable y alineado con prácticas sostenibles aplicables en zonas costeras.

El segundo objetivo permitió determinar las características sensoriales del jabón exfoliante y evaluar su aceptación frente a un producto comercial de referencia (GC1). Los resultados sensoriales obtenidos coinciden con lo expuesto por Honcharov et al. (2024) y Sisodiya et al. (2024), quienes afirman que los atributos organolépticos como textura, aroma, color y sensación al tacto influyen directamente en la percepción de calidad del usuario. En comparación con el jabón comercial, la formulación C2H2R1 obtuvo un puntaje total superior (535 frente a 484), destacando principalmente en textura, olor y sensación al enjuagar, mientras que el producto comercial presentó menor percepción exfoliante.

La evaluación a través de la prueba de Kruskal-Wallis evidenció diferencias significativas entre las formulaciones ( $p < 0,05$ ), lo que demuestra que las variaciones en las proporciones de componentes en el jabón producen cambios perceptibles para los consumidores. Si bien en la Tabla 3 se observa que las formulaciones C2H2R2, C2H2R3, C3H2R2 y C3H2R3 presentan puntajes similares, la selección final de C2H2R1 y C3H2R1 se fundamentó en un análisis integral posterior, considerando no solo la aceptación sensorial sino también los resultados fisicoquímicos y microbiológicos, priorizando aquellas formulaciones con mejor equilibrio entre desempeño sensorial y parámetros técnicos de calidad. Asimismo, Salsabila et al. (2021) destacan que el equilibrio entre los parámetros fisicoquímicos, como humedad y pH, permite obtener jabones con mejor estabilidad y rendimiento sensorial. En el presente estudio, los valores de pH obtenidos fueron 10,12 para C2H2R1 y 10,48 para C3H2R1, mientras que la humedad registrada en ambas muestras fue de 13,42 % y 12,32 %, respectivamente, por lo que se encuentra dentro de los límites establecidos por la NTP 319.073:1978. Los índices de espuma para ambas muestras fueron de 1,70 % y 1,96 %, respectivamente, lo que evidencia un comportamiento espumante funcional en ambas formulaciones. La combinación de estos factores de granulometría controlada, proporción adecuada de valvas, equilibrio en la concentración de NaOH y estabilidad del pH confirma que es posible obtener un producto sensorialmente atractivo y competitivo empleando insumos de origen natural y sostenible.

El tercer objetivo estuvo orientado a evaluar las características fisicoquímicas y microbiológicas de los jabones elaborados, con la finalidad de verificar su cumplimiento con los parámetros establecidos en la NTP 319.073:1978. Los valores obtenidos de pH, humedad e índice de espuma, así como la ausencia de microorganismos patógenos, están de acuerdo con lo señalado por Honcharov et al. (2024), quienes afirman que estos parámetros determinan la calidad, seguridad y funcionalidad de un jabón artesanal. La ausencia de bacterias patógenas y mohos demostró que el proceso de producción fue higiénico y adecuado, lo que garantizó la inocuidad del producto. Las ligeras diferencias observadas entre formulaciones pueden atribuirse a la proporción de valvas incorporadas y a la variación en la concentración de NaOH, debido a que el material exfoliante fue el mismo en todas las formulaciones, y se diferenciaba únicamente en su porcentaje de incorporación de valvas. El secado se realizó a temperatura ambiente durante 24 horas, lo que permitió la estabilización estructural del jabón antes de su evaluación.

El cuarto objetivo analizó la relación beneficio/costo y el impacto ambiental del proyecto, aspectos clave para determinar su viabilidad integral. La relación B/C obtenida de 1,30 evidenció que el proyecto es económicamente rentable, considerando costos de producción y proyección de ventas. Este hallazgo coincide con lo informado por Montenegro et al. (2024), quienes destacan que los modelos de aprovechamiento de residuos marinos pueden generar beneficios económicos sostenibles al transformar los desechos en productos comercializables.

En el plano ambiental, se logró una reducción del 11 % de la cantidad de residuos marinos. Este resultado demuestra que el proyecto contribuye progresivamente a la mitigación de la contaminación en zonas costeras.

En general, los resultados obtenidos según los cuatro objetivos trazados en este estudio confirman que la elaboración de jabones exfoliantes a partir de valvas de concha de abanico representa una opción viable desde el punto de vista técnico, sensorial, económico y ambiental, además de guardar coherencia con los principios de economía circular y de valorización de residuos marinos.

## CONCLUSIONES

La elaboración del jabón exfoliante empleando valvas de *Argopecten purpuratus* se consolidó como una alternativa técnicamente viable y ambientalmente pertinente para valorizar residuos marinos en la región de Piura. El uso de valvas recicladas permitió obtener un jabón con características sensoriales competitivas y una rentabilidad favorable; además, se evidenció una reducción aproximada del 11 % de la cantidad de desechos generados por la actividad pesquera, valor calculado mediante la relación entre la cantidad de valvas reutilizadas y la estimación anual de residuos generados en la zona de estudio. Estos

resultados confirman que la propuesta se alinea con los enfoques de economía circular y uso sostenible de los recursos locales.

La determinación de las operaciones más eficientes del proceso productivo permitió definir una secuencia técnica adecuada, la cual fue representada en el diagrama de operaciones de proceso (DOP) e incluyó las etapas de recepción y acopio, lavado y desinfección, secado, molienda (0,3-0,4 mm) de valvas, el proceso de saponificación a 80 °C, e incorporación de valvas pulverizadas y moldeo. Estas etapas resultaron determinantes para asegurar la calidad y estabilidad del jabón. El adecuado manejo de las valvas, junto con el control de la temperatura y de los tiempos de mezclado, garantizó la obtención de un producto con adecuada consistencia, dureza y capacidad de formación de espuma, mientras que la incorporación de polvo de valva en proporciones controladas de 0,5 %, 2 % y 3 % respecto al peso total del jabón (100 gramos por unidad experimental) brindó una acción exfoliante efectiva y regulada.

En la evaluación sensorial, las formulaciones obtenidas presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), destacando la variante C2H2R1 por su mayor aceptación integral, considerando no solo el puntaje total (535), sino también su equilibrio posterior con los resultados fisicoquímicos y microbiológicos. Esta formulación mostró características organolépticas favorables, como textura uniforme, aroma agradable y adecuada formación de espuma. Los ensayos fisicoquímicos confirmaron valores de pH de 10,12; 13,42 % de humedad, y 1,70 % de índice de espuma, mientras que los análisis microbiológicos evidenciaron ausencia de microorganismos patógenos, cumpliendo con los parámetros establecidos en la NTP 319.073:1978, lo que garantiza la inocuidad y durabilidad del producto.

Desde el enfoque económico y ambiental, la propuesta mostró una rentabilidad sostenida y un impacto positivo sobre la gestión de residuos marinos. La relación beneficio/costo de 1,30 se obtuvo dividiendo el precio de venta proyectado por unidad (S/ 6,32) entre el costo promedio de producción (S/ 4,86). El VAN y la TIR se estimaron con base en los flujos de caja proyectados para el periodo 2025-2038; se obtuvo un VAN positivo de S/ 30 115 277,41 y una TIR del 32 %, superior a la tasa de descuento considerada, lo que evidencia la viabilidad financiera del proyecto. Paralelamente, la reducción del volumen de valvas desechadas confirma su contribución a la mitigación de la contaminación costera y al desarrollo de prácticas productivas más sostenibles.

En resumen, la elaboración de jabón exfoliante utilizando valvas de *Argopecten purpuratus* representa una alternativa sostenible con potencial uso en mercados locales, pues demuestra beneficios ambientales, sociales y económicos. Este enfoque integra la gestión responsable de residuos marinos con la generación de productos de valor agregado, aportando a la diversificación productiva y a la sostenibilidad regional.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

**Jocellyn Nallely Peña Jimenez:** conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, recursos, supervisión, validación, redacción: revisión y edición. **Ubaldo Iair Trelles Salazar:** *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, recursos, *software*, visualización, escritura: borrador original. **Gabriel Ernesto Borrero Carrasco:** supervisión, validación metodológica, redacción: revisión y edición.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE IA GENERATIVA

Los autores utilizaron herramientas de IA generativa únicamente para mejorar la redacción, gramática y claridad del manuscrito. La interpretación de resultados, análisis y conclusiones corresponden exclusivamente a los autores.

## REFERENCIAS

- Arias Gonzáles, J. L., & Covinos Gallardo, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. Enfoques Consulting EIRL. [https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias\\_S2.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf)
- Asociación Nacional de Fabricantes de Conservas de Pescados y Mariscos. (2020). *Informe técnico. Evaluación de la gestión de los residuos del proceso de concha de abanico y propuestas de mejora*. Acuipisca Perú. [https://rnia.produce.gob.pe/wp-content/uploads/2022/07/InformeTecnico\\_GestionResiduosCA\\_v2\\_ANFACO-A7.3-para-RNIA.pdf](https://rnia.produce.gob.pe/wp-content/uploads/2022/07/InformeTecnico_GestionResiduosCA_v2_ANFACO-A7.3-para-RNIA.pdf)
- Ayuda en Acción Perú. (2023, 29 de noviembre). *Las conchas de abanico, una industria resiliente*. <https://ayudaenaccion.org.pe/actualidad/las-conchas-de-abanico-una-industria-resiliente/>
- Azarian, M. H., & Sutapun, W. (2022). Biogenic calcium carbonate derived from waste shells for advanced material applications: A review. *Frontiers in Materials*, 9, 1024977. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1024977>
- Chenet, T., Schwarz, G., Neff, C., Hattendorf, B., Günther, D., Martucci, A., Cescon, M., Baldi, A., & Pasti, L. (2024). Scallop shells as biosorbents for water remediation from heavy metals: Contributions and mechanism of shell components in the adsorption of cadmium from aqueous matrix. *Heliyon*, 10(7), e29296. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29296>

- Del Castillo Luis, D., Palomino Achulla, A., Larios Francia, R., & Quino Favero, J. (2023). Sustitución del carbonato de calcio inorgánico por carbonato de calcio biogénico obtenido de residuos de las vieiras (*Argopecten purpuratus*) en las industrias peruanas. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 3640-3656. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i1.4680](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4680)
- Honcharov, I., Vyshnevskaya, L., & Bodnar, L. (2024). Research on the development of solid soap composition for the prevention and treatment of psoriasis relapse. *ScienceRise: Pharmaceutical Science*, 5(51), 47-54. <https://doi.org/10.15587/2519-4852.2024.313702>
- Instituto Nacional de Calidad. (2017). *Jabones y detergentes. Jabón de tocador. Requisitos (NTP 319.073:1978, revisada el 2017)*. DePerú.com. <https://www.deperu.com/normas-tecnicas/NTP-319-073.html>
- International Organization for Standardization. (2021). *ISO 21392:2021. Cosmetics—Analytical methods—Measurement of traces of heavy metals in cosmetic finished products using ICP/MS technique*. <https://www.iso.org/standard/70854.html>
- Lin, Y., Lu, J., & Wu, J. (2021). Heavy metals pollution and health risk assessment in farmed scallops: Low level of Cd in coastal water could lead to high risk of seafood. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111768. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111768>
- Loayza Aguilar, R., Valencia Cruz, R., & Valencia Cruz, G. (2023). Carbono inmovilizado en las valvas provenientes de cultivos industriales de *Argopecten purpuratus* en el Perú y su potencial en el mercado de carbono. *Ecosistemas*, 32(2), 2461. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2461>
- Mauricio Villarrial, R. A., & Farfán Córdova, M. G. (2021). *Structural concrete modified with scallop shell lime*. *Revista Ingeniería de Construcción*, 36(3), 380-388. <https://doi.org/10.7764/ric.00010.21>
- Ministerio de la Producción. (2020, 24 de febrero). *Residuos del langostino y conchas de abanico pueden mejorar calidad de agua para uso acuícola*. <https://rnia.produce.gob.pe/residuos-del-langostino-y-conchas-de-abanico-pueden-mejorar-calidad-de-agua-para-uso-acuicola/>
- Montenegro, V., Hernández, D., Domínguez, A., Vergara, F., Arrocha, J., & González-Valoys, A. (2024). Estabilización de suelos expansivos en Panamá con mezclas de residuos de concha de mar. *Revista Politécnica*, 54(1), 45-52. <https://doi.org/10.33333/rp.vol54n1.05>
- Pantoja Pena, D. W., Tonoli, G. H. D., Protásio, T. de P., de Souza, T. M., Ferreira, G. C., do Vale, I., Ferreira, I. M., & Bufalino, L. (2021). Exfoliating agents for skincare soaps obtained

- from the crabwood waste bagasse, a natural abrasive from Amazonia. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 4441-4461. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01336-3>
- Panwanitdumrong, K., & Chen, C.-L. (2022). Are tourists willing to pay for a marine litter-free coastal attraction to achieve tourism sustainability? Case study of Libong Island, Thailand. *Sustainability*, 14(8), 4808. <https://doi.org/10.3390/su14084808>
- Peña Jiménez, J. N., & Trelles Salazar, U. I. (2025). *Elaboración de jabón exfoliante con valvas de Argopecten purpuratus para reducir residuos en Piura, 2025* [Tesis de pregrado inédita]. Universidad César Vallejo.
- Salsabila, W. S., Husein, Y. A., Rahmadsyah, Z., Rahmaniar, R., Ramadhan, L. O. A. N., & Alimin, A. (2021). Transparent collagen soap from shellfish (*Anadara granosa*) with additional oils from olae plant (*Etilingera calophrys*). *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences*, 17(Supl. 2), 106-110. [https://medic.upm.edu.my/upload/dokumen/202104291536132020\\_0895\\_29.pdf](https://medic.upm.edu.my/upload/dokumen/202104291536132020_0895_29.pdf)
- Sisodiya, S., Gautam, S., Aneja, D., & Debnath, M. (2024). Exploring the usage of olive leaf and green synthesized olive leaf metallic nanoparticles as soap supplement for the formulation and optimization of innovative germicidal herbal soap. *Industrial Crops and Products*, 219, 119012. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119012>
- Topić Popović, N., Lorencin, V., Strunjak-Perović, I., & Čož-Rakovac, R. (2023). Shell waste management and utilization: Mitigating organic pollution and enhancing sustainability. *Applied Sciences*, 13(1), 623. <https://doi.org/10.3390/app13010623>
- Zayed, L., Gablo, N., Kalcakova, L., Dordevic, S., Kushkevych, I., Dordevic, D., & Tremlova, B. (2024). Utilizing used cooking oil and organic waste: A sustainable approach to soap production. *Processes*, 12(6), 1279. <https://doi.org/10.3390/pr12061279>

# MEJORA PARA REDUCIR LA TASA DE RECHAZO DE PIEZAS DEFECTUOSAS EN UNA EMPRESA DE NAVES INDUSTRIALES DEL SECTOR METALMECÁNICO APLICANDO SPC, TPM Y 5S

NOEMI YASMIN CARITA GALINDO

<https://orcid.org/0009-0008-7404-6032>

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

NICOLE NAHOMI VILLANUEVA ALARCÓN

<https://orcid.org/0009-0006-5483-6665>

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

WILSON DAVID CALDERÓN GONZALES

<https://orcid.org/0000-0002-8388-335X>

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

Recibido: 1 de febrero del 2026 / Aceptado: 30 de marzo del 2026

Publicado: 15 de junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8562>

**RESUMEN.** En este trabajo, se analiza la presencia de piezas defectuosas en la fabricación de naves industriales en una pyme metalmecánica, lo que genera reprocesos, retrasos productivos y pérdidas estimadas de hasta US\$ 17 333 anuales. Para contrarrestar ello, se desarrolló un modelo de simulación en Arena Simulation, con el fin de comparar escenarios. Dicha propuesta integra herramientas como control estadístico de procesos, mantenimiento productivo total y metodología 5S para reducir la tasa de defectos del 10 % al 5,2 %, mediante controles de calidad, mantenimiento preventivo y capacitación técnica.

**PALABRAS CLAVE:** mejora continua / reprocesos / SPC / TPM / 5S / sector metalmecánico

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: 20200413@aloe.ulima.edu.pe, 20202266@aloe.ulima.edu.pe, wdcald@ulima.edu.pe

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## IMPROVEMENT TO REDUCE THE REJECTION RATE OF DEFECTIVE PARTS IN AN INDUSTRIAL WAREHOUSE COMPANY IN THE METALWORKING SECTOR BY APPLYING SPC, TPM, AND 5S

**ABSTRACT.** This paper addresses the high rejection rate of defective parts in the manufacturing of industrial structures in a metalworking company. The causes include defective raw materials, machinery failures due to lack of maintenance, low staff training, and lack of process standardization. These issues generate rework, production delays, and losses of up to USD 17 333 per year. address this problem, a discrete-event simulation model based on Statistical Process Control (SPC), Total Productive Maintenance (TPM), and the 5S methodology is proposed to evaluate improvements in the production process. The model aims to reduce the defect rate from 10% to 5,2% through quality control mechanisms, preventive maintenance, and technical training.

**KEYWORDS:** continuous improvement / reprocesses / SPC / TPM / 5S / metal-mechanic sector

## INTRODUCCIÓN

El sector metalmecánico desempeña un papel fundamental en el desarrollo industrial debido a su participación en la fabricación de estructuras metálicas, equipos industriales y componentes utilizados en sectores como la minería, la construcción y la infraestructura. Sin embargo, los procesos de manufactura en este sector enfrentan desafíos relacionados con la variabilidad en la calidad de los productos, la presencia de defectos en las piezas fabricadas y la falta de estandarización de los procesos, lo que genera reprocesos, pérdidas económicas y una disminución de la eficiencia operativa. En el Perú, el sector metalmecánico cuenta con más de 2170 empresas exportadoras (Pardo, 2023), lo que evidencia su relevancia en la economía nacional. Asimismo, estudios señalan que la presencia de defectos y la falta de estandarización en los procesos metalmecánicos afectan la eficiencia y competitividad de las empresas (Corro et al., 2024).

Diversas investigaciones han demostrado que la implementación de metodologías de mejora continua permite optimizar los procesos productivos y reducir defectos en las organizaciones manufactureras. En este sentido, metodologías como *lean six sigma* han mostrado resultados significativos: Narottam et al. (2020) documentaron un incremento del rendimiento del proceso de 97,33 % a 99,1 % en seis meses, mientras que Suaña Revilla et al. (2024) identificaron mejoras sustanciales en productividad y reducción de tiempos en empresas metalmecánicas. Asimismo, herramientas de organización y estandarización, como la metodología 5S, han demostrado impactos positivos. Por ejemplo, Murrieta Guillen et al. (2024) reportaron una reducción del 69 % en tiempos muertos, con un ahorro anual de US\$ 2177,86 y una tasa interna de retorno (TIR) de 13,72 % en una empresa metalmecánica peruana. De manera complementaria, Florez-Cáceres et al. (2024) evidenciaron mejoras del 23,8 % en eficiencia y una reducción del 32,04 % en tiempos de *setup*, mediante la integración de *lean* y mantenimiento productivo total (*total productive maintenance*, TPM) en una pyme del sector.

La adopción de modelos de gestión de la calidad total (*total quality management*, TQM) también ha demostrado efectos positivos en el desempeño organizacional y en la eficiencia de los costos de calidad. Elvina et al. (2022) evidenciaron que la implementación de TQM mejora la eficiencia de los costos de calidad y el desempeño gerencial, con implicaciones positivas en el rendimiento organizacional, mientras que Manley et al. (2024) mostraron que la aplicación de TQM con un enfoque estratégico tiene efectos positivos y significativos en el desempeño financiero y operativo de pequeñas empresas.

A pesar de estos beneficios, muchas pequeñas y medianas empresas del sector presentan limitaciones en la implementación de sistemas estructurados de gestión de calidad. Esto coincide con lo señalado por Medina-Elizondo et al. (2022), quienes destacan la importancia de contar con sistemas de gestión de calidad en la cadena de suministro para garantizar eficiencia y competitividad en la industria metalmecánica.

Un ejemplo de esta situación es una empresa del sector metalmecánico dedicada a la fabricación de naves industriales que presenta una tasa de rechazo de piezas defectuosas del 10 %, lo que supera el umbral crítico del sector. El análisis del proceso productivo permitió identificar diversas causas asociadas a la generación de defectos, entre las que destacan la presencia de materia prima defectuosa proveniente de proveedores, la ausencia de mantenimiento preventivo en las máquinas de soldadura, el bajo nivel de capacitación técnica del personal en el área de corte y la falta de estandarización en los procedimientos operativos. Estas causas fueron determinadas mediante herramientas de diagnóstico, como el diagrama de Ishikawa, el árbol de problemas y el análisis de datos históricos del proceso productivo.

La literatura señala que la implementación de modelos de TQM requiere no solo herramientas técnicas, sino también el fortalecimiento de las competencias del personal y la coordinación de los equipos de trabajo para garantizar la correcta aplicación de prácticas de mejora continua y el seguimiento de indicadores de desempeño. Farida et al. (2021) evidenciaron que el nivel de preparación individual y organizacional en la implementación de TQM tiene un efecto significativo en el desempeño de la calidad, lo que explica el 43 % de su variación. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de integrar la gestión del talento humano y el compromiso organizacional en los procesos de mejora continua.

En función de este contexto, se plantea la siguiente hipótesis de investigación: si se implementa un modelo basado en TQM, mediante la integración de herramientas como control estadístico de procesos (*statistical process control*, SPC), TPM y 5S, entonces la tasa de productos defectuosos en la empresa se reducirá significativamente, acercándose a los estándares del sector metalmecánico. Esta hipótesis se sustenta en experiencias documentadas en empresas manufactureras que lograron reducciones significativas en sus tasas de rechazo y mejoras en la eficiencia productiva mediante estrategias de gestión de calidad (ElMelegy et al., 2022).

Finalmente, la investigación se justifica por su impacto económico, social, ambiental y científico. La reducción de defectos permitirá disminuir los costos asociados a reprocesos y a desperdicios de materia prima, así como mejorar el desempeño del personal mediante el fortalecimiento de sus competencias técnicas. Además, la reducción de residuos metálicos contribuye a una gestión más eficiente de los materiales y a la sostenibilidad del proceso productivo. Desde el punto de vista científico, el estudio aporta evidencia sobre la aplicación integrada de herramientas de gestión de calidad evaluadas mediante simulación de eventos discretos para analizar su impacto en la mejora de procesos del sector metalmecánico, alineándose además con los principios de gestión establecidos en normas internacionales como ISO 9001 e ISO 4500.

## METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló en una empresa del sector metalmecánico ubicada en Lima, Perú, dedicada a la fabricación de estructuras metálicas. La empresa se clasifica como una pequeña empresa, cuyas operaciones productivas se concentran en las áreas de corte, soldadura y ensamblaje.

El diseño de la investigación es no experimental, debido a que las variables del sistema no fueron manipuladas directamente en el entorno real, sino analizadas mediante el desarrollo de un modelo de simulación por eventos discretos. Este enfoque permite evaluar el comportamiento del sistema productivo y estimar el impacto de propuestas de mejora antes de su implementación en el sistema real.

La información utilizada en el estudio fue obtenida mediante observación directa del proceso productivo, revisión de registros históricos de producción y entrevistas al jefe de planta y al personal del área de control de calidad. Estos datos permitieron comprender el funcionamiento del sistema productivo e identificar los principales factores asociados a la presencia de defectos en las piezas fabricadas.

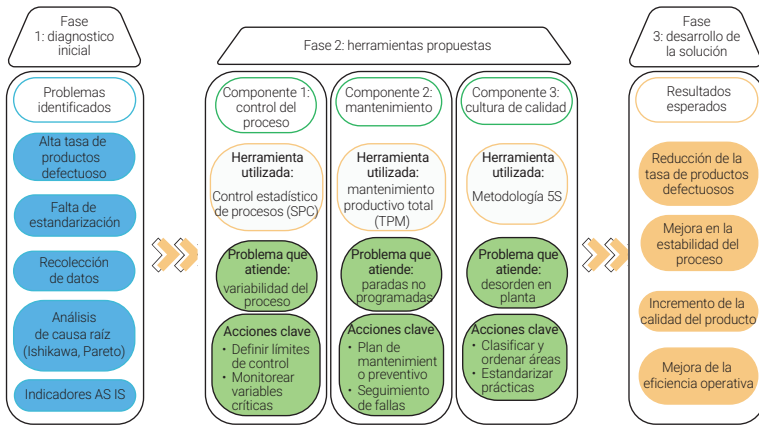
Para la recolección de datos del proceso productivo se utilizó un muestreo aleatorio simple. El tamaño de muestra fue determinado mediante la fórmula para poblaciones finitas, considerando un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 5 %. Esta fórmula fue seleccionada debido a que el volumen de producción observado durante el periodo de estudio era conocido y limitado, correspondiente a ochenta piezas, lo cual permite estimar de manera más precisa el número de observaciones necesarias para representar adecuadamente el comportamiento del proceso productivo.

La metodología de la investigación se estructuró en tres fases principales: diagnóstico inicial del proceso, diseño de la propuesta de mejora y validación mediante simulación, como se muestra en la Figura 1. Este enfoque se basa en metodologías utilizadas en estudios de mejora de procesos industriales en los que se integran herramientas de gestión de calidad con modelos de simulación para evaluar el impacto de propuestas antes de su implementación real.

Para la recolección de información, se utilizaron entrevistas semiestructuradas con el jefe de planta y el equipo de control de calidad, así como la revisión de registros históricos de producción correspondientes a los procesos de corte y soldadura.

Figura 1

Modelo de la propuesta de solución

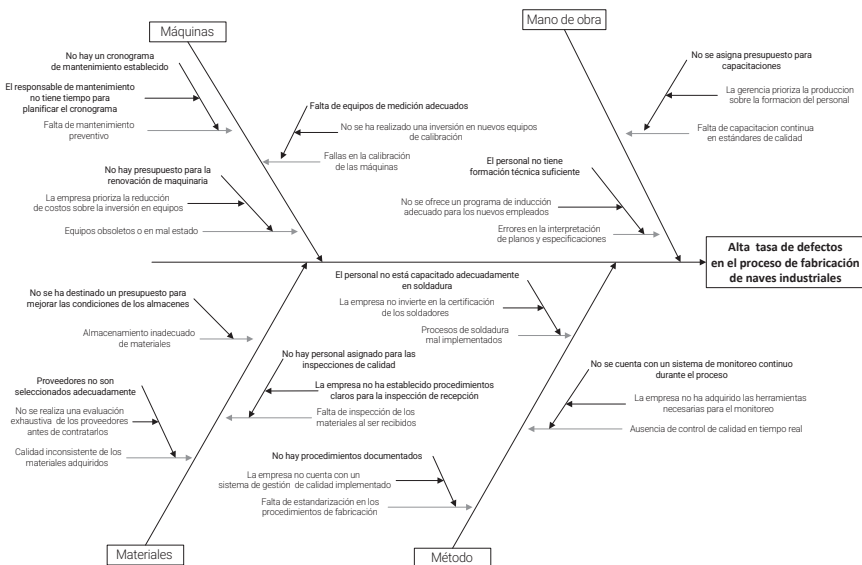


## RESULTADOS

El análisis situacional del proceso productivo permitió identificar las principales causas que han originado el alto porcentaje de piezas defectuosas en las áreas de corte y soldadura. Estas causas, detectadas mediante entrevistas semiestructuradas, revisión de registros históricos y observación directa, fueron clasificadas en cuatro categorías: método, mano de obra, maquinaria y materiales, las cuales se presentan en un diagrama de Ishikawa (Figura 2).

Figura 2

Diagrama de Ishikawa



Entre las causas más relevantes destacan la presencia de materia prima defectuosa proveniente de los proveedores, la ausencia de mantenimiento preventivo en las máquinas de soldadura, el bajo nivel de capacitación técnica del personal en el área de corte y la falta de estandarización en los procedimientos operativos. Asimismo, la observación directa del área de soldadura evidenció que las herramientas, materiales y piezas se encontraban dispersos sin una ubicación definida, lo que genera tiempos improductivos y condiciones de trabajo poco eficientes, tal como se observa en la Figura 3.

**Figura 3**

*Organización de herramientas, materiales y de la estación de trabajo en el área de soldadura*



Luego de ello, se registraron los tiempos de operación para los distintos tipos de piezas, los cuales se presentan en la Tabla 1. Estos datos permitieron identificar la variabilidad del proceso y sirvieron como base para ajustar las distribuciones estadísticas utilizadas en la simulación.

**Tabla 1**

*Control de tiempos por pieza*

Número de pieza	Vigas H	Tubos de fierro	Placas de acero	Revestimiento de aluminio	Pernos de sujeción
1	6,55	5,49	4,56	4,50	1,32
2	6,34	6,45	3,58	3,56	1,25
3	5,35	6,56	4,38	4,34	1,03
4	5,52	6,34	4,53	4,55	1,07
5	6,42	7,36	4,32	4,27	1,02

*(continúa)*

(continuación)

Número de pieza	Vigas H	Tubos de fierro	Placas de acero	Revestimiento de aluminio	Pernos de sujeción
6	6,32	6,48	4,52	4,39	1,13
7	7,34	6,32	5,10	4,29	1,02
8	6,45	7,32	5,12	4,58	0,45
9	7,15	7,26	4,50	4,18	0,56
10	5,58	6,42	4,38	4,56	0,55
11	6,34	6,54	4,51	4,59	0,48
12	6,12	6,27	4,52	5,10	1,26
13	6,06	6,45	3,59	3,55	1,20
14	5,58	7,12	5,26	4,57	1,25
15	6,48	7,16	4,57	5,03	0,49
16	7,03	6,54	4,55	4,38	0,45

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento del proceso productivo y obtener parámetros confiables para el modelo de simulación, se calcularon los principales estadísticos descriptivos de los tiempos de operación en las áreas de corte y soldadura, a partir de ochenta observaciones por proceso. Como se observa en la Tabla 2, el proceso de soldadura presenta una media de 7,45 minutos y una desviación estándar de 1,02 minutos, mientras que el proceso de corte registra una media de 5,32 minutos con una desviación estándar de 0,81 minutos. Estos valores evidencian la variabilidad presente en el sistema productivo, la cual puede afectar directamente el desempeño general del proceso.

**Tabla 2***Estadísticos descriptivos de tiempos de proceso*

Proceso	Media (min)	Desv. estándar	Mínimo	Máximo	N.º observaciones
Corte	5,32	0,81	4,10	7,20	80
Soldadura	7,45	1,02	5,90	9,10	80

Adicionalmente, como se muestra en la Figura 4, mediante el uso del módulo Input Analyzer del *software* Arena Simulation, se determinó que los tiempos de inspección siguen una distribución normal con media de 6,48 minutos y desviación estándar de 0,395 minutos. Dichos parámetros fueron incorporados como variables de entrada en la simulación.

**Figura 4**

*Distribución de tiempos establecidos en el software Arena Simulation*

Distribution Summary	
Distribution:	Normal
Expression:	NORM(6.48, 0.324)
Square Error:	0.016354
Chi Square Test:	
Number of intervals	= 3
Degrees of freedom	= 0
Test Statistic	= 1.05
Corresponding p-value	< 0.005

Con el fin de evaluar el desempeño del proceso de soldadura frente a los límites de especificación establecidos, se realizó un análisis de los parámetros de control junto con su carta de control de tiempos correspondiente (Tabla 3).

**Tabla 3**

*Resultados del análisis estadístico del proceso de soldadura (Cp y Cpk)*

Muestra	Promedio ( $\bar{X}$ )	Rango (R)	Límite inferior (LSL)	Límite superior (USL)	Cp	Cpk	Interpretación
Soldadura 1	4,02	0,42	3	5	0,83	0,78	Proceso fuera de capacidad, variabilidad alta
Soldadura 2	3,97	0,35	3	5	0,88	0,85	Proceso parcialmente estable, aún requiere ajuste
Soldadura 3	4,10	0,38	3	5	0,91	0,89	Tendencia hacia la mejora, pero aún no conforme
Promedio global	—	—	—	—	0,87	0,84	El proceso no cumple con los límites de especificación

Los resultados evidencian que el proceso de soldadura no opera bajo condiciones óptimas, con valores promedio de Cp = 0,87 y Cpk = 0,84. Dado que un proceso se considera capaz cuando Cpk  $\geq$  1,33, estos valores confirman la presencia de variabilidad significativa y la necesidad de aplicar mecanismos de control estadístico para mejorar la estabilidad del proceso.

En este escenario, se construyó una nueva carta de control de los tiempos de operación, cuyos parámetros se presentan en la Tabla 4. Se observa una comparativa entre el escenario base versus el escenario mejorado. El proceso mantiene un promedio de 6,55 minutos, pero con una reducción significativa en la dispersión de los datos, con lo que alcanza una desviación estándar de 0,08 minutos. Como resultado, los límites de control se reducen a un rango más estrecho, con un límite superior (LSC) de 6,79 minutos y un límite inferior (LIC) de 6,31 minutos.

**Tabla 4**

*Parámetros de la carta de control comparativa escenario base vs. escenario mejorado*

Parámetro	Escenario base (min)	Escenario mejorado (min)
Promedio (CL)	6,55	6,55
Desviación estándar	1,63	0,08
Límite superior (LSC)	11,44	6,79
Límite inferior (LIC)	1,66	6,31

Los resultados de la Tabla 5 evidencian una mejora significativa en la capacidad del proceso en el escenario mejorado. El valor de  $C_p = 2,08$  indica que la variabilidad del proceso se encuentra ampliamente dentro de los límites de especificación, mientras que el valor de  $C_{pk} = 1,88$  confirma que el proceso está correctamente centrado y es capaz de cumplir con los estándares de calidad establecidos. En comparación con el escenario base, estos resultados reflejan una reducción considerable de la variabilidad y una mejora en el control del proceso productivo.

**Tabla 5**

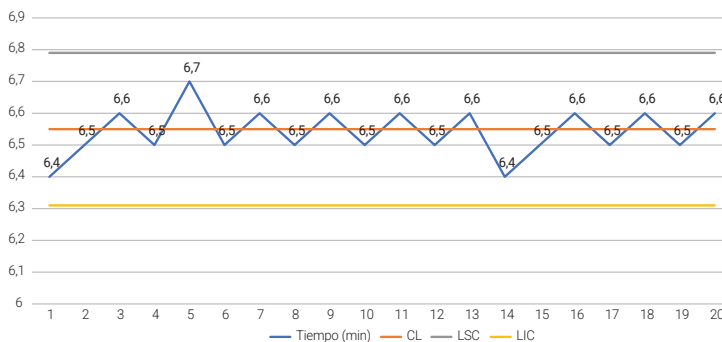
*Índices de capacidad del proceso en el escenario mejorado*

Indicador	Valor	Interpretación
$C_p$	2,08	Alta capacidad del proceso
$C_{pk}$	1,88	Proceso altamente capaz y centrado

En la Figura 5, se observa que los tiempos de operación se distribuyen de manera uniforme alrededor de la línea central, sin presentar puntos fuera de los límites de control. Asimismo, la dispersión de los datos es reducida, lo que evidencia un comportamiento estable del proceso.

**Figura 5**

*Gráfica de control del escenario mejorado*



El análisis de los tiempos de operación de las dieciséis piezas observadas por tipo de material (vigas H, tubos de fierro, placas de acero, revestimiento de aluminio y pernos de sujeción) permitió identificar los rangos de variabilidad por cada proceso. Estos datos fueron utilizados para ajustar las distribuciones estadísticas del modelo de simulación y establecer los límites de control para la detección temprana de piezas defectuosas, organizando la producción en subgrupos de cuatro unidades con revisión de cada una de las dieciséis piezas.

El registro de fallas de maquinaria durante el periodo de análisis evidenció una frecuencia acumulada de setenta y tres paradas no programadas en seis meses, con una variabilidad considerable en los tiempos de detención. La distribución mensual de estas paradas se presenta en la Tabla 6. Asimismo, se presenta el detalle de los tiempos de parada registrados, los cuales hacen referencia a la alta variabilidad en la duración de las interrupciones del proceso productivo.

**Tabla 6**

*Registro de paradas no programadas por mes*

Mes	S1	S2	S3	S4	Total de paradas
1	1	2	5	2	10
2	3	4	5	1	13
3	6	2	1	1	10
4	4	2	6	1	13
5	1	3	3	5	12
6	3	7	3	2	15
Total					73

En relación con el desempeño de la maquinaria, como se muestra en la Tabla 7, se registró la frecuencia de paradas no programadas durante el periodo de análisis. Se evidenciaron variaciones en la ocurrencia de fallas durante el tiempo de evaluación.

**Tabla 7**

*Registro de paradas no programadas*

N.º de paro	Tiempo (min)	N.º de paro	Tiempo (min)	N.º de paro	Tiempo (min)
1	04:07,0	25	09:03,8	49	06:31,9
2	05:27,1	26	05:46,0	50	09:48,3
3	06:00,3	27	06:44,3	51	06:24,6
4	04:09,7	28	04:15,1	52	08:15,2
5	07:19,4	29	06:15,1	53	07:40,6

*(continúa)*

(continuación)

N.º de paro	Tiempo (min)	N.º de paro	Tiempo (min)	N.º de paro	Tiempo (min)
6	05:54,4	30	05:15,8	54	04:14,4
7	04:15,9	31	03:50,6	55	10:20,6
8	06:40,7	32	06:26,8	56	07:14,9
9	09:15,6	33	05:40,8	57	08:03,3
10	05:43,7	34	10:18,1	58	09:34,8
11	04:33,8	35	04:20,1	59	07:58,6
12	05:19,1	36	06:34,7	60	05:25,3
13	05:28,7	37	04:26,6	61	06:38,1
14	04:18,2	38	07:48,9	62	08:43,8
15	04:28,2	39	07:53,5	63	10:22,3
16	06:04,6	40	07:32,6	64	07:10,7
17	05:48,3	41	05:34,6	65	06:21,5
18	05:21,3	42	07:05,9	66	05:23,4
19	03:44,1	43	07:28,4	67	08:34,7
20	04:25,0	44	08:19,4	68	04:30,9
21	07:35,2	45	06:28,8	69	06:09,3
22	06:50,5	46	08:09,8	70	09:58,0
23	09:23,3	47	06:54,2	71	05:37,1
24	05:57,4	48	07:24,6	72	04:19,6
				73	05:50,8

En conjunto, el registro de paradas no programadas evidencia una frecuencia acumulada de setenta y tres eventos durante el periodo de análisis, con una variabilidad considerable en los tiempos de detención. Por ello, se propuso implementar un plan de mantenimiento planificado y autónomo que se puede observar en la Tabla 8, con inspecciones semanales, limpieza técnica y capacitación básica en detección de fallas para los operarios.

**Tabla 8***Plan de mantenimiento preventivo*

Equipo	Actividad de mantenimiento	Frecuencia	Responsable	Tiempo estimado (min)	Tipo
Máquina de corte 1	Limpieza general y retiro de residuos	Diario	Operario	10	Autónomo
Máquina de corte 2	Verificación de alineación y ajustes	Semanal	Técnico de mantenimiento	30	Preventivo

(continúa)

(continuación)

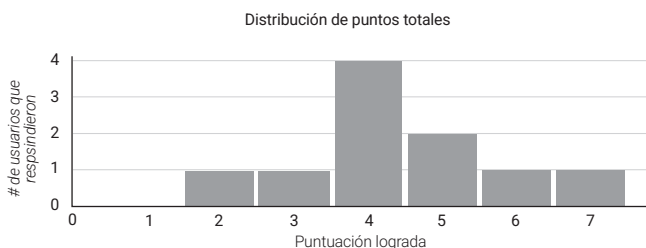
Equipo	Actividad de mantenimiento	Frecuencia	Responsable	Tiempo estimado (min)	Tipo
Máquina de corte 3	Lubricación de partes móviles	Semanal	Técnico de mantenimiento	20	Preventivo
Máquina de soldadura 1	Inspección de cables y conexiones	Semanal	Técnico de mantenimiento	25	Preventivo
Máquina de soldadura 2	Calibración de parámetros de soldadura	Mensual	Supervisor técnico	40	Preventivo
Compresor	Revisión de presión y fugas	Mensual	Técnico de mantenimiento	30	Preventivo
Sistema eléctrico	Inspección de tableros y conexiones	Trimestral	Técnico eléctrico	45	Preventivo

Como parte del programa de capacitación técnica propuesto, se aplicó una evaluación previa de conocimientos al personal operativo mediante la plataforma Google Forms, la cual arrojó los resultados mostrados en la Figura 6. Estos resultados evidencian una marcada deficiencia en los conocimientos de los trabajadores, ya que solo el 25 % respondió de manera correcta a las preguntas.

**Figura 6**

Resultados de la evaluación de conocimientos

Estadística



La auditoría inicial del área de trabajo reveló niveles bajos de cumplimiento en criterios clave como señalización, estandarización y rutinas de limpieza. Tras la implementación de la metodología 5S, la auditoría final alcanzó el nivel máximo de cumplimiento (2 puntos) en todos los criterios evaluados. De igual modo, los resultados mostrados en la Tabla 9 indican que, en la

auditoría inicial, varios criterios presentaban niveles bajos de cumplimiento, especialmente en señalización, estandarización y rutinas de limpieza. Tras la implementación de la metodología, la auditoría final alcanzó el nivel máximo de cumplimiento en todos los criterios evaluados, lo que refleja mejoras significativas en el orden, limpieza y disciplina operativa.

**Tabla 9**

*Resultados de auditoría inicial y final*

Tipos	Criterio de evaluación	Auditoría inicial	Auditoría final
Seiri (Clasificar)	Eliminación de materiales innecesarios	0	2
	Identificación de materiales necesarios	1	2
Seiton (Ordenar)	Ubicación definida de herramientas	1	2
	Señalización y delimitación de áreas	0	2
Seiso (Limpiar)	Limpieza del área de trabajo	1	2
	Rutinas de limpieza establecidas	0	2
Seiketsu (Estandarizar)	Procedimientos visuales de orden	0	2
	Uso de formatos y señalización estándar	0	2
Shitsuke (Disciplina)	Cumplimiento de las normas 5S	1	2
	Capacitación y concientización del personal	0	2

**Figura 7**

*Resultados de la aplicación de la metodología 5S*



La Figura 7 muestra los resultados obtenidos después de la implementación de la metodología 5S. Se observa una mejora en el orden del área de trabajo, la correcta ubicación de las herramientas y los materiales, así como una mayor estandarización de los espacios productivos.

Uno de los principales objetivos del modelo propuesto fue reducir la tasa de defectos en el proceso productivo. A partir de la implementación de las herramientas de gestión de calidad, se evaluó el comportamiento del sistema mediante simulación y se obtuvo una reducción de la tasa de defectos del 10 % en el escenario base a un promedio de 5,2 % en el escenario mejorado. Esta reducción fue estimada a partir de las veinte réplicas ejecutadas en el modelo de simulación, considerando los días operativos. Los resultados mostraron una disminución consistente en la proporción de productos no conformes, lo que evidencia el impacto positivo de la integración de las herramientas SPC, TPM y 5S en el control del proceso productivo.

Tal como se observa en la Tabla 10, los resultados indican que el mayor impacto se obtuvo mediante la aplicación del SPC en el control de materia prima, pues se logró una reducción estimada del 30 % en defectos asociados a proveedores. Por su parte, la implementación del TPM contribuyó a reducir en 25 % los defectos relacionados con fallas de maquinaria, mientras que la aplicación de 5S permitió disminuir errores operativos asociados a falta de estandarización y capacitación.

**Tabla 10**

*Reducción por cada componente*

Componente afectado	Herramienta aplicada	Tasa inicial (%)	Tasa final estimada (%)	Reducción (%)
Materia prima (proveedor)	SPC	40	28,00	30
Fallas de maquinaria	TPM	20	15,00	25
Errores de corte por falta de formación	5S	25	21,25	15
Variabilidad por falta de estandarización	5S	15	12,75	15

La Tabla 11 presenta la evaluación técnico-económica del impacto del modelo propuesto considerando una muestra de cien piezas. A partir de los resultados de la simulación, la reducción de la tasa de defectos de 10 % a 5,2 % permite disminuir las piezas defectuosas de 10 a 5 unidades. En términos económicos, esto representa una reducción del costo por defectos de US\$ 1733 a US\$ 867, lo que genera un ahorro de US\$ 866, equivalente a una disminución aproximada del 50 % en los costos de no calidad.

**Tabla 11***Evaluación técnico-económica*

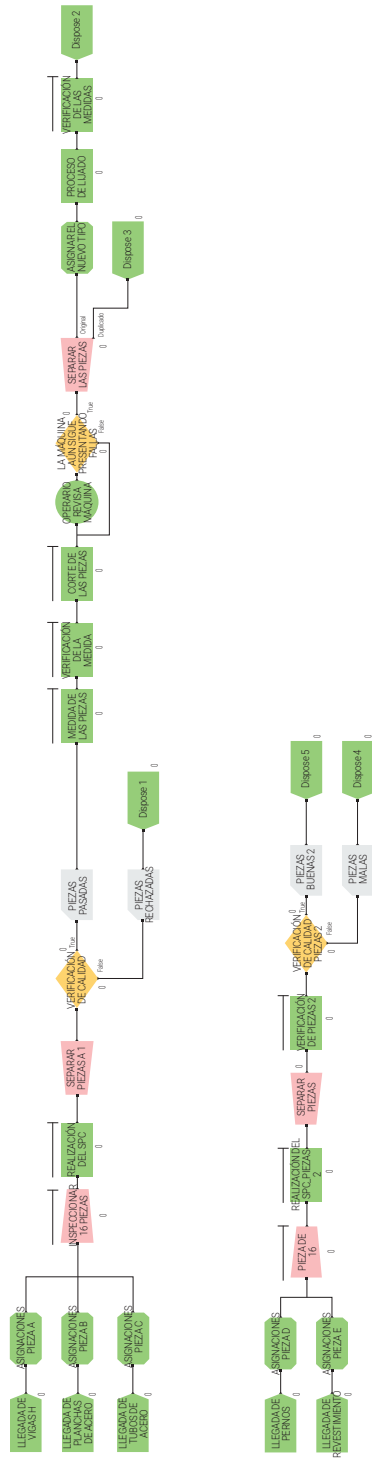
Indicador	Escenario base	Escenario mejorado	Variación absoluta	Variación relativa
Producción total (piezas)	100	100	—	—
Tasa de defectos (%)	10,0	5,2	-4,8	-48
Piezas defectuosas (ud.)	10	5	-5	-48
Costo unitario por defecto (USD)	173	173	—	—
Costo total por defectos (USD)	1733	867	-866	-50

Para comenzar, debemos tener en consideración cómo es el proceso actual de la empresa. Para eso, se detalla que, en el escenario base, el proceso productivo inicia con la recepción de la materia prima, la cual ingresa directamente a producción sin un control estadístico formal de calidad. Posteriormente, las piezas pasan al área de corte, donde los tiempos de operación presentan alta variabilidad y las fallas de la maquinaria se gestionan únicamente mediante mantenimiento correctivo, lo que genera paradas no programadas. Tras el corte, las piezas son enviadas al proceso de soldadura, en el que no existen procedimientos estandarizados ni controles sistemáticos del desempeño del operario. Finalmente, las piezas son inspeccionadas de manera visual a fin de detectar defectos, pero en etapas tardías del proceso, lo que ocasiona reprocesos y rechazos.

Teniendo en cuenta eso, se validó el modelo mejorado, tal como se muestra en la Figura 8. Esto se realizó mediante una simulación por eventos discretos en Arena Simulation. Se ejecutaron veinte réplicas por escenario con un horizonte de noventa días operativos. Los tiempos de verificación, corte y fallas de máquina fueron modelados según las distribuciones obtenidas con el módulo Input Analyzer.

Se puede observar en la Figura 8, la cual hace referencia al modelo de simulación, que este considera la agrupación de las piezas mediante bloques Batch controlados por atributo, lo que permite conformar lotes de trabajo equivalentes a dieciséis piezas por tipo de material. La aplicación del SPC se modeló a través de un proceso de inspección con recurso asignado y tiempo definido por expresión, seguida de una verificación probabilística que determina la aceptación o rechazo de las piezas. Las piezas no conformes son separadas del flujo mediante bloques Separate. Los procesos de medición y corte se representaron con una lógica similar, diferenciándose únicamente en los tiempos de operación y los criterios de verificación. Asimismo, las fallas de la maquinaria fueron modeladas mediante tiempos de demora adicionales que representan paradas imprevistas y actividades de revisión por parte del operario.

**Figura 8**  
Modelo de simulación mejorado en Arena con herramientas



El desarrollo del estudio se realizó durante un periodo aproximado de ocho semanas, incluyendo las etapas de recolección de datos, análisis del proceso productivo, identificación de causas y desarrollo del modelo de simulación. El costo estimado del estudio fue de aproximadamente US\$ 773, compuesto principalmente por las horas de trabajo del equipo de análisis, el uso del *software* especializado para la simulación y los recursos operativos asociados con la recolección y el procesamiento de datos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se evaluaron los indicadores de utilización del operario de medición, utilización de la máquina de corte, eficiencia del proceso de corte y capacidad real del sistema antes y después de la implementación de la propuesta.

Para asegurar la confiabilidad estadística de los resultados obtenidos en la simulación, se determinó el número mínimo de réplicas mediante la expresión  $n = (t \cdot s / e)^2$ , donde  $t$  corresponde al valor de la distribución  $t$  de Student con un nivel de confianza del 95 % ( $t = 2,262$ ),  $s$  representa la desviación estándar muestral ( $s = 0,0195$ ) y  $e$  corresponde al error tolerado ( $e = 0,01$ ). A partir de estos parámetros, se estableció la ejecución de veinte réplicas para cada escenario de simulación, garantizando así la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Con base en dicha expresión, se obtuvo un mínimo de veinte réplicas para cada escenario de simulación (escenario base y escenario mejorado), garantizando la confiabilidad estadística de los resultados obtenidos. A continuación, en la Tabla 12 se presenta la comparación de los indicadores evaluados en ambos escenarios.

**Tabla 12**

*Comparación de indicadores por escenario*

Indicador	Escenario base (%)	Escenario mejorado (%)
Utilización del operario de medición	100	91,5
Utilización de la máquina de corte	20	15,0
Eficiencia del proceso de corte	50	61,9
Capacidad real del sistema	50	68,9

Como se observa en la Tabla 12, se comparan los cuatro indicadores clave (utilización del operario, máquina, eficiencia del corte y capacidad del sistema) en los escenarios base y mejorado. Esta comparación está basada en los resultados obtenidos por simulación y se utiliza como respaldo cuantitativo para validar el impacto del modelo.

En la Tabla 13, se analiza el comportamiento de los recursos críticos dentro del sistema antes y después de la implementación. Se evaluaron tres componentes clave: operario de medición, máquina de corte y operario de corte, considerando su porcentaje de utilización promedio en ambos escenarios simulados.

**Tabla 13**

*Comparación de utilización promedio*

Recurso	Base (%)	Mejorado (%)
Operario de medición	90,95	93,10
Máquina de corte	2,28	2,57
Operario de corte	1,52	1,69

Los resultados que nos arroja la Tabla 13 indican que, aunque la carga para los trabajadores y los operarios se mantiene alta, su distribución es más equilibrada y estable, lo cual mejora dentro del rendimiento operativo general. La ligera mejora que existe en la utilización de la máquina de corte (+ 0,29 %) y del operario de corte (+ 0,17 %) se debe a la implementación del TPM y de las 5S, ya que estos reducen el tiempo muerto y aumentan la fluidez dentro del proceso de creación de naves industriales. Asimismo, el incremento del uso del operario de medición (+ 2,15 %) también es favorable, ya que refleja una mayor interacción con controles de calidad sin sobrecargar al personal, gracias a mejores tiempos por pieza y mayor previsibilidad.

Finalmente, para asegurar la sostenibilidad de las mejoras implementadas, se aplicaron listas de chequeo semanales, supervisión visual diaria y una evaluación mensual del cumplimiento, utilizando una escala de 1 a 5 puntos para cada dimensión evaluada.

## DISCUSIÓN

La simulación de la propuesta permitió comprobar que la aplicación conjunta de las herramientas SPC, TPM y 5S genera mejoras importantes en el proceso productivo. En términos de calidad, el desempeño del proceso se evalúa conforme a los criterios técnicos establecidos por la American Welding Society en la norma AWS D1.1/D1.1M:2025, la cual establece que el desalineamiento en juntas a tope no debe exceder el 10 % del espesor de la parte unida más delgada ni los 3 mm, considerándose el valor menor (American Welding Society, 2025). Este criterio permite asegurar el control de tolerancias geométricas y la integridad estructural de las uniones soldadas. Asimismo, este resultado confirma que la propuesta planteada es funcional y permite mejorar el desempeño del proceso, además de reforzar la importancia de integrar la gestión de calidad con la sostenibilidad organizacional, tal como señalan Zhang et al. (2024).

En el caso del SPC, su implementación permitió identificar materia prima defectuosa antes de que ingrese a la producción, a fin de evitar reprocesos y desperdicios en etapas posteriores. Este hallazgo coincide con lo reportado por Corro et al. (2024), quienes señalan que el uso de herramientas de control estadístico en empresas metalmecánicas permite prevenir fallas desde las primeras etapas del proceso y mejorar la calidad de los insumos.

La aplicación del TPM tuvo un efecto directo en la reducción de las paradas no programadas de la máquina de corte. En el escenario mejorado, las interrupciones mensuales disminuyeron de trece a ocho eventos en promedio, mientras que el tiempo acumulado de parada se redujo en un 35 %, lo que permitió un flujo de producción más continuo y estable. Este resultado es consistente con lo reportado por Naeem et al. (2021), quienes evidencian que la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo contribuye a mejorar el rendimiento de los equipos y reducir los tiempos de inactividad. En el presente estudio, esta mejora impacta directamente en la continuidad del proceso productivo y contribuye a la reducción de defectos al disminuir las interrupciones y la variabilidad en las operaciones.

Por último, la implementación de la metodología de las 5S permitió mejorar significativamente las condiciones del área de trabajo, lo que evidenció una mayor organización, limpieza y estandarización de los espacios productivos. De acuerdo con los resultados de la auditoría inicial y final, los criterios evaluados pasaron de niveles de cumplimiento entre 0 y 1 en la etapa inicial a un nivel máximo de 2 en todos los ítems evaluados, lo que evidencia una mejora integral en la aplicación de la metodología. Estas mejoras contribuyeron a la reducción de errores operativos y tiempos improductivos asociados a la búsqueda de herramientas y materiales.

Estos resultados guardan coherencia con lo reportado por Murrieta Guillen et al. (2024), quienes evidencian que la implementación de las 5S puede generar reducciones de hasta el 69 % en los tiempos muertos y un ahorro anual de US\$ 2177,86 en empresas del sector metalmecánico. Si bien dichos valores corresponden a un contexto distinto, sirven como referencia para validar que la mejora en la organización y estandarización del área de trabajo tiene un impacto directo en la eficiencia operativa y en la reducción de costos. Asimismo, estos hallazgos se alinean con lo planteado por Soltan y Omar (2022), quienes destacan que la estandarización de procesos y la adecuada organización del trabajo permiten optimizar el flujo operativo y reducir la fatiga del personal.

## CONCLUSIONES

El análisis realizado en la empresa de estudio permitió identificar que la elevada tasa de rechazo de piezas defectuosas se originó principalmente por cuatro factores: presencia de materia prima defectuosa, fallas en las máquinas por ausencia de mantenimiento preventivo, bajo nivel de capacitación del personal operativo y falta de procedimientos estandarizados. Estas situaciones afectaron la estabilidad del sistema y generaron reprocesos que disminuyeron la eficiencia operativa.

Los resultados obtenidos mediante la simulación en el *software* Arena Simulation demostraron que la implementación integrada de herramientas de gestión de calidad es

efectiva para mejorar el desempeño del proceso productivo. En particular, la tasa de defectos se redujo del 10 % al 5,2 % y alcanzó valores aceptables dentro del sector metalmecánico, lo que confirmó el cumplimiento del objetivo general de la investigación.

La aplicación conjunta de SPC, TPM y 5S permitió mejorar indicadores clave del sistema productivo, como la estabilidad de los tiempos de proceso, la reducción de paradas no programadas y una mejor utilización de los operarios. Estos resultados evidencian que la integración de herramientas de gestión de calidad dentro de un enfoque de mejora continua puede generar impactos positivos en la eficiencia global y en la capacidad real de producción de las pequeñas empresas manufactureras.

Desde una perspectiva organizacional, la propuesta contribuye a fortalecer una cultura de calidad y mejora continua, lo que incrementa la participación del personal y su compromiso con los objetivos operativos. Además, la reducción de defectos y reprocesos disminuye el desperdicio de materiales y el consumo innecesario de recursos, lo que aporta beneficios ambientales y se alinea con principios de sostenibilidad promovidos en la literatura especializada.

Finalmente, como limitaciones del estudio, se reconoce que el análisis se basa en un modelo de simulación construido a partir de datos históricos y observaciones de un solo contexto empresarial, lo cual puede restringir la generalización de los resultados hacia otras organizaciones del sector. Asimismo, no se realizó una implementación real de las mejoras propuestas, por lo que los resultados obtenidos corresponden a un entorno simulado. Futuras investigaciones podrían validar la propuesta mediante su aplicación práctica en diferentes empresas del sector metalmecánico.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

**Noemi Yasmin Carita Galindo:** conceptualización, curación de datos, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, administración del proyecto, recursos, visualización, escritura: borrador original, y redacción: revisión y edición. **Nicole Nahomi Villanueva Alarcón:** conceptualización, curación de datos, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, metodología, *software*, validación, visualización, escritura: borrador original, y redacción: revisión y edición. **Wilson David Calderón Gonzales:** conceptualización, análisis formal, investigación, supervisión, validación y redacción: revisión y edición.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE IA GENERATIVA

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron ChatGPT como apoyo para la mejora de redacción, organización del contenido y corrección de estilo. Posteriormente, el contenido fue revisado y editado según fue necesario, y los autores asumen la plena responsabilidad del contenido final del artículo.

## REFERENCIAS

- American Welding Society. (2025). *Structural welding code—Steel*. [https://pubs.aws.org/Download\\_PDFS/D1.1-D1.1M-2025WebPV.pdf](https://pubs.aws.org/Download_PDFS/D1.1-D1.1M-2025WebPV.pdf)
- Corro, D., Tisnado, M., Ontaneda-Portal, M., & Algoner, W. (2024). A systematic review of the lean model manufacturing in the supply chain of the metal-mechanical companies. *Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024): Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0* (pp. 1-9). LACCEI. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1461>
- Elvina, E., Anggraeni, S., Sasongko, S. N., & Erlandian, A. Y. (2022). The influence of total quality management (TQM) on quality cost efficiency and managerial performance and the implications for company performance. *Indonesian Interdisciplinary Journal of Sharia Economics*, 5(2), 460-481. <https://e-journal.uac.ac.id/index.php/iijs/article/view/2161>
- ElMelegy, A. R., Alnajem, M., & Albuloushi, N. (2022). Assessment of quality performance in the Egyptian manufacturing industry. *The TQM Journal*, 34(5), 1365-1394. <https://doi.org/10.1108/tqm-06-2021-0161>
- Farida, G., Prabowo, H., & Husnur, A. (2021). The readiness of human resources and organization in implementing total quality management (TQM) in Indonesia's manufacturing industries. *Journal of Engineering Research*, 9(4), 246-261 <https://doi.org/10.36909/jer.9903>
- Florez-Cáceres, R. M., Huamán-Echevaría, C. E., & Quiroz-Flores, J. C. (2024). Improving productivity in an SME in the metalworking sector through lean manufacturing and TPM tools. A case study in Peru. *The South African Journal of Industrial Engineering*, 35(2), 91-109. <https://doi.org/10.7166/35-2-3013>
- Manley, S. C., Williams, R. I., Jr, & Hair, J. F., Jr. (2024). Enhancing TQM's effect on small business performance: a PLS-SEM exploratory study of TQM applied with a comprehensive strategic approach. *The TQM Journal*, 36(5), 1252-1272. <https://doi.org/10.1108/tqm-10-2021-0299>

- Medina-Elizondo, M., Molina-Morejón, V. M., Fernández-Contreras, L., & Rodríguez-Figueroa, S. (2022). Quality management system in the supply chain of the metal mechanical manufacturing industry. *ECORFAN Journal Republic of Peru*, 8(14), 24-33. <https://doi.org/10.35429/ejrp.2022.14.8.24.33>
- Murrieta Guillen, L. J., Alva Alvarez, M., & Díaz Díaz, M. A. (2024). Design of 5S and ATS to reduce costs in a metal-mechanical company. En *Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024): Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0* (pp. 1-9). LACCEI. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1589>
- Naeem, M., Ahmad, N., Hussain, S., Nafees, B., & Hamid, A. (2021). Impact of lean manufacturing on the operational performance: Evidence from textile industry. *Humanities & Social Sciences Reviews*, 9(3), 951-961. <https://doi.org/10.18510/hssr.2021.9393>
- Narottam, K., Mathiyazhagan, K., & Sharma, V. (2020). Defect reduction in manufacturing industry using lean six sigma approach. En H. Kumar & P. K. Jain, *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 19-30). Springer. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-1071-7\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-1071-7_3)
- Pardo, E. (2023). *Metalmecánica: ¿qué es? Situación actual, perspectivas y desafíos en el mercado peruano [2025]*. Diametral. <https://diametral.pe/blog/industria-metalmecanica-peru/>
- Soltan, H., & Omar, M. (2022). A roadmap for selection of metal welding process: a review and proposals. *Welding in the World*, 66, 2639-2675. <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01379-1>
- Suaña Revilla, M. S., Mendoza Vilca, M. F., & Márquez, G. J. (2024). Improving production processes in the metalworking industry through the implementation of lean and six sigma tools: A systematic literature review. En *Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024): Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0* (pp. 1-9). LACCEI. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.864>
- Zhang, S., Rew, D., Jung, J., Wu, S., & Baldo, C. (2024). Impact of organizational citizenship behavior on corporate sustainability through the mediation of TQM: Focus on the textile industry in Bangladesh. *The TQM Journal*, 36(8), 2193-2210. <https://doi.org/10.1108/tqm-02-2023-0056>

# EXPERIMENTAL ANALYSIS OF INDUSTRIAL PACKAGING FOR *CHICHA DE JORA* IN LAMINATED CARDBOARD

MARCO ANTONIO GUARDAMINO CASTRO

<https://orcid.org/0000-0003-3846-1884>

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

MARCOS LUIS HUMBERTO SÁNCHEZ FERRER MARENGO

<https://orcid.org/0000-0003-3956-4391>

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

MARCOS FERNANDO RUIZ-RUIZ\*

<https://orcid.org/0000-0001-5147-8512>

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

Received: January 21, 2026 / Accepted: March 12, 2026

Published: June 15, 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.7818>

**ABSTRACT.** *Chicha de jora*, a traditional beverage made from fermented corn, is widely consumed in the Andean regions of South America. This study aims to experimentally demonstrate the technological feasibility of using laminated cartons for the industrial packaging of *chicha de jora*, in accordance with the Peruvian Technical Standard NTP 210.026:2007. Additionally, it analyzes variations in the beverage's physicochemical characteristics. We conducted the study using an experimental, longitudinal, pretest-posttest design with a control group over a 12-week observation period. Key parameters evaluated in the study were pH, total acidity, total sugars content, and alcohol content. The results for the experimental group indicated a pH of  $2,51 \pm 0,03$ , total acidity of  $32,56 \pm 1,21$  g/L, total sugars of  $8,29 \pm 0,56$  °Brix, and alcohol content of  $8,00 \pm 0,71$ % vol. These values indicate that the primary physicochemical parameters remained stable over time, suggesting

---

No entity has funded this study.

\* Author correspondance.

Email addresses in order of appearance: [20170677@ulima.edu.pe](mailto:20170677@ulima.edu.pe); [20172637@ulima.edu.pe](mailto:20172637@ulima.edu.pe); [mruiz@ulima.edu.pe](mailto:mruiz@ulima.edu.pe)

This article is open access, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.

that the laminated cardboard packaging had no significant impact on its physicochemical characteristics.

KEYWORDS: *chicha de jora* / industrial packaging / laminated cardboard / experimental analysis / physicochemical properties

## ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL ENVASADO INDUSTRIAL DE CHICHA DE JORA EN CARTÓN LAMINADO

RESUMEN. La chicha de jora, bebida elaborada a partir de maíz fermentado, es un brebaje tradicional muy consumido en las regiones andinas de Sudamérica. El objetivo de este estudio fue demostrar experimentalmente la viabilidad tecnológica del envasado industrial de la bebida en cartón laminado, utilizando como referencia la Norma Técnica Peruana (NTP) 210.026:2007, mediante el análisis de la variación de sus características fisicoquímicas. El estudio se llevó a cabo con un diseño experimental, longitudinal, pretest-postest, con un grupo de control, durante un periodo de observación de doce semanas. Se evaluaron parámetros como el pH, la acidez total, el contenido total de azúcar y el contenido de alcohol. Los resultados obtenidos de la evaluación de los parámetros fisicoquímicos para el grupo experimental fueron pH  $2,51 \pm 0,03$ , acidez total  $32,56 \pm 1,21$  g/L, azúcar total  $8,29 \pm 0,56$  °Brix y contenido de alcohol  $8,00 \pm 0,71$  % vol. Estos valores muestran que los principales parámetros se mantienen estables a lo largo del tiempo, sin que el cartón laminado tenga un impacto significativo en las características fisicoquímicas de la chicha de jora.

PALABRAS CLAVE: *chicha de jora* / envasado industrial / cartón laminado / análisis experimental / propiedades fisicoquímicas

## INTRODUCTION

*Chicha de jora* is an alcoholic, fermented beverage with deep historical roots in Peru. Its production and consumption can be traced back to pre-Hispanic times, during which it served important ritual, social, and nutritional functions within Andean communities (Vargas-Yana et al., 2020). This beverage is produced from malted corn, known as “maíz de jora”, which is cooked and then fermented naturally, resulting in a light brown drink with a distinct aroma and slightly acidic taste. The alcohol content is relatively low, ranging from 1 % to 3 %, comparable to that of some craft beers (Bassi et al., 2020). The primary organoleptic characteristics of *chicha de jora* are outlined in the following table (see Table 1).

**Table 1**

*Organoleptic characteristics of chicha de jora*

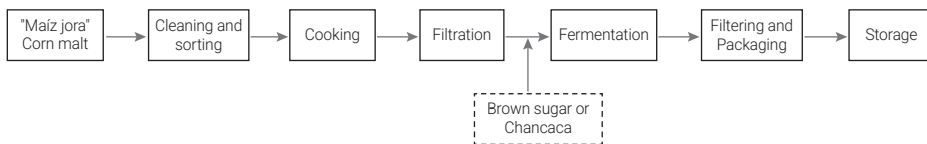
Organoleptic characteristics	Definition	Indicator
Color	The color varies based on the raw materials used in production, and its variability is also influenced by the duration of the fermentation period.	Light brown
Aroma	As substances evaporate during the fermentation process, <i>chicha de jora</i> acquires its distinctive aromas.	“Sui generis”
Flavor	The flavor profile evolves throughout the fermentation period. <i>Chicha de jora</i> initially presents a sweet corn profile, then transitions to a bittersweet one. Ultimately, it culminates in a sour, sweet, and acidic character.	Bittersweet and pleasant
Degree of clarity	The property associated with the luminous aspect of color.	Turbid
Sedimentation	The property associated with the turbidity that results from the formation of gums, proteins, and yeasts.	Present

Note. Adapted from “Elaboración tradicional de chicha de jora”, by E. de Florio Ramírez, 2019, *Ciencia & Desarrollo*, 1, pp. 92-96 (<https://doi.org/10.33326/26176033.1995.1.26>).

Despite its historical significance and cultural value, *chicha de jora* remains predominantly produced through artisanal methods, as illustrated in Figure 1. This persistence can be attributed to the empirical transmission of ancestral knowledge, which has successfully maintained the beverage’s authenticity while concurrently limiting its technological advancement and access to larger markets. According to De Florio Ramírez (2019) and Aguirre Logrono (2009), traditional production involves several fundamental stages, including preparation of raw materials, wort cooking, filtration, and spontaneous fermentation. However, the absence of technical standardization in these processes results in variations in chemical composition, sensory characteristics, and the stability of the final product, ultimately impacting both yield and quality.

**Figure 1**

Process diagram for the production of chicha de jora



Note. Adapted from "Elaboración tradicional de chicha de jora", by E. de Florio Ramírez, 2019, *Ciencia & Desarrollo*, 1, pp. 92-96 (<https://doi.org/10.33326/26176033.1995.1.26>).

This situation underscores the necessity of proposing technological alternatives that optimize *chicha de jora* production while preserving its traditional qualities. The lack of specific technical standards and the inadequate implementation of quality control standards hinder the industrialization and large-scale commercialization of this beverage (Camacho, 2019). Unlike other fermented beverages, such as beer and wine, *chicha de jora* is devoid of regulations that establish uniform parameters for fermentation, packaging, storage, and labeling. This technological deficiency not only undermines its competitiveness but also jeopardizes the preservation of a product with profound historical and cultural significance.

Several studies indicate that modernizing the production of *chicha de jora* requires the adoption of standardized processes that ensure both quality and stability. Ara Rojas et al. (2018) conducted research focused on standardizing fermentation processes by evaluating physicochemical parameters and comparing them with traditional methods. Their findings demonstrate that the implementation of controlled techniques facilitates the production of a beverage with more homogeneous and reproducible characteristics, while preserving its distinctive sensory properties. These advancements establish a foundation for the future industrialization of the beverage under sustainable technological conditions.

From a cultural perspective, several authors have emphasized the symbolic and social significance of *chicha de jora* within Andean communities. Chunqui (2019) and Azanza and Chacón (2018) characterize it as the "drink of the gods", serving as a symbol of identity and collective heritage, with its consumption closely associated with celebration and community reciprocity. However, market presence has considerably declined in recent decades, as *chicha de jora* has been supplanted by industrialized beverages that benefit from enhanced promotion and distribution. Researchers attribute this decrease in consumption not only to insufficient dissemination and standardization but also to challenges related to packaging, preservation, and shelf life.

In this context, the integration of new packaging technologies serves as a crucial strategy to revitalize the presence of *chicha de jora* in both national and international markets. Traditionally, producers have used glass bottles to package this beverage.

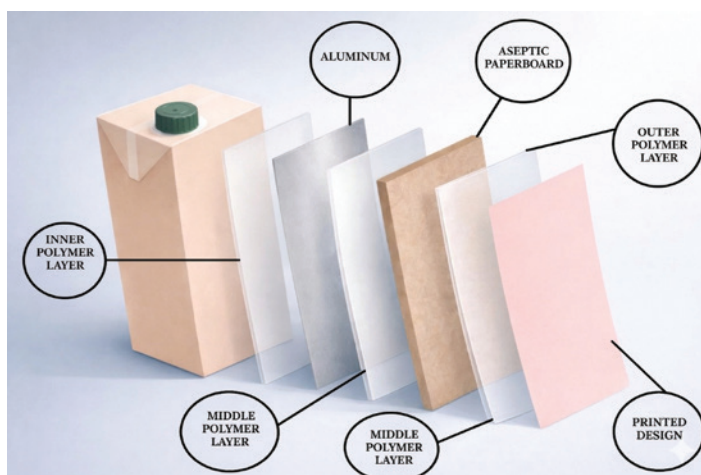
While glass ensures effective preservation of the product, it also has several significant disadvantages, including the fragility of glass and the significant weight of glass packaging, which elevates transportation costs. There are also considerable environmental impacts associated with the production and recycling of glass (Thompson-Witrick et al., 2021). In contrast, laminated carton packaging has emerged as a widely utilized alternative for packaging beverages, owing to its mechanical strength and durability. The incorporation of laminated polymers and aluminum layers considerably enhances barrier properties against external factors such as light, oxygen, and humidity, which are critical for preserving liquid beverages (Olsmats et al., 2015).

### Laminated cardboard containers for beverages

Laminated cartons, which are composed of layers of paper, polyethylene, and, in some instances, aluminum (as illustrated in Figure 2), demonstrate mechanical strength as well as outstanding barrier properties. These features help preserve the product's physicochemical and organoleptic qualities (Bolzon et al., 2015). Moreover, the low weight and compact design of laminated cartons improve transportation and storage efficiency, thereby contributing to reduced energy consumption and greenhouse gas emissions (Brock & Williams, 2020). Research conducted by Turrado et al. (2012) and Kirwan (2005) underscores the versatility of laminated cartons for both aseptic beverages, which do not require refrigeration, and non-aseptic beverages, which do require refrigeration. This versatility consequently expands the potential applications for laminated cartons in the food industry (see Figure 2).

**Figure 2**

*Composition of laminated cardboard packaging*



Note. Developed with artificial intelligence by the authors.

Laminated cartons significantly contribute to sustainability and circular economic trends. Ciravegna (2020) argues that our production and consumption systems must transition toward more environmentally responsible models to address the challenges posed by climate change and waste management. In this context, Ferrara and De Feo (2020) demonstrate that laminated carton packaging and bag-in-box systems exhibit lower environmental impacts than plastics and glass packaging, owing to their composition, logistical efficiency, and recycling potential. These findings underscore the importance of investigating the application of laminated carton packaging in traditional products, such as *chicha de jora*.

The incorporation of laminated carton packaging in the beverage industry not only represents a technical advancement but also offers an opportunity to blend tradition with innovation. By implementing a modern, sustainable packaging solution for this ancestral product, producers can extend its shelf life, streamline distribution, and enhance its appeal in both domestic and international markets. Furthermore, the transition supports compliance with existing environmental and health regulations in the country, notably Supreme Decree No. 007-98-SA (Ministerio de Salud del Perú, 1998), which governs the safety and handling conditions of food products, as well as the guidelines established by the Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) and the Ministerio de Salud del Perú (MINSA) (Dirección General de Salud Ambiental & Ministerio de Salud del Perú, 2008), which aim to ensure the safety and quality of food.

From a scientific perspective, evaluating the technological feasibility of packaging *chicha de jora* in laminated cartons requires an analysis of their behavior concerning various physicochemical variables. Relevant parameters—including pH, total acidity, sugar content, and alcohol content—serve as essential indicators for assessing the physicochemical quality of the final product in fermented beverages (Fentie et al., 2022). Similarly, these parameters play a critical role in the quality control of non-alcoholic beverages, as they constitute fundamental criteria for evaluating product stability and acceptability during storage (Gernet et al., 2019). These indicators will facilitate the examination of whether the packaging material influences the product's stability and quality by assessing potential physicochemical variations during storage and comparing these variations with those observed in traditional packaging, such as glass. This analysis will provide a foundation for identifying the impact of packaging on product preservation. The goal of implementing a sustainable and functional packaging solution is not to replace tradition but to enhance it by integrating modern technology that ensures product preservation without compromising its essence. Therefore, this research is driven by a dual purpose: to preserve the cultural heritage of *chicha de jora* and to promote technological innovation within the Peruvian food sector.

In this context, the present study seeks to determine the technological feasibility of packaging *chicha de jora* in laminated carton containers by evaluating their influence

on the beverage's physicochemical characteristics. Additionally, the study examines the potential of this packaging type as a sustainable alternative to glass, which enables a more efficient, standardized, and environmentally friendly production process. By addressing these objectives, the research aims to establish a foundation for the future industrialization of *chicha de jora*, preserving this ancestral product while positioning it within a competitive market that values both quality and sustainability.

## METHODOLOGY

This study employed an experimental design with a longitudinal approach, wherein the researchers deliberately manipulated the independent variables and monitored the outcomes over time. A pretest-posttest design, incorporating a control group, was utilized to assess the effects of packaging type on the physicochemical characteristics of *chicha de jora* over a 12-week observation period.

The research team processed the information using both qualitative and quantitative approaches at descriptive and explanatory levels. The study took place in the Technical Advisory Laboratory in Health Sciences of Dr. Jorge Luis Díaz Ortega in Trujillo, Peru. Two experimental groups were established: one group utilized glass packaging (control group), while the other employed laminated cartons (experimental group), with both groups utilizing 750 mL containers. Both packaging types were monitored for approximately three months post-packaging. At the beginning of the study, twenty-four samples from each group were collected to assess various parameters relevant to the shelf life of the pasteurized fermented beverage (Techakanon & Sirimuangmoon, 2020). The samples were kept in conditions protected from sunlight, and sample size was determined based on the intention to analyze two containers every week during the study period—one from each group. This strategy facilitated weekly monitoring of the subject's behavior under both packaging conditions, with the first sampling conducted one week after storage ( $t = 1$ ). All tests were conducted at an average temperature of  $28 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$  for both groups. Table 2 presents the methodological sequence employed in the research, outlining the stages from instrument preparation to results analysis.

For the data collection stage corresponding to section 2.1 (Stage 2) as described in Table 2, the dependent variables were designated as pH, total acidity, total sugars content, and alcohol content. In the absence of a specific technical standard for *chicha de jora*, the Peruvian Technical Standard (NTP) 210.026:2007, which outlines the requirements for cider, was utilized as a reference to standardize analytical procedures and ensure the methodological validity of the study (Instituto Nacional de Calidad, 2019). According to Seluy et al. (2018), cider is produced through the alcoholic fermentation of apple juice by natural or added yeasts, followed by a pre-conditioning and sweetening stage using

corn syrup or sucrose. Given the similarities between this process and the traditional fermentation of *chicha de jora*—both relying on the conversion of fermentable sugars into alcohol—NTP 210.026:2007 served as an appropriate technical reference for defining parameters and experimental protocols in the current research.

**Table 2**

*Methodological sequence*

N°	Stage	Substage	Description
1	Preparation of instruments	1.1. Conditioning of laminated cardboard packaging	Cleaning and disinfection of laminated cardboard containers
		1.2. Pasteurization of <i>chicha de jora</i>	Heating <i>chicha de jora</i> for 15 minutes at 80-90 °C
		1.3. Packaging and sealing of <i>chicha de jora</i>	Filling by volume and sealing with a plastic screw cap
		1.4. Storage and preservation of <i>chicha de jora</i>	Using a closed storage facility at a temperature of 28 ± 0,7°C
2	Data collection	2.1. Analysis of dependent variables	Performing various analyses in the laboratory
		2.2. Excel registration	Entering the results obtained into Excel
3	Statistical analysis	3.1. Bar chart	Preparing graphs showing the results to simplify the interpretation of the data collected

### Measurement of physicochemical characteristics

#### -pH

The pH was determined using the potentiometric method. Specifically 10,0 g of *chicha de jora* (or its equivalent of 10,0 mL) was placed in a beaker, followed by the addition of 100,0 mL of distilled water. The mixture was gently stirred to homogenize the sample while preserving its physicochemical properties. Prior to the measurement, we calibrated the potentiometer with standard buffer solutions to ensure accuracy. The electrodes were then immersed in the prepared sample, and we recorded the pH value once the reading stabilized. We conducted measurements using an Oakton® 700 Benchtop pH Meter (China), under controlled laboratory conditions, maintaining an average temperature of 28 ± 0,7°C. This procedure involved multiple independent determinations (n ≥ 3), with a minimum of three repetitions per sample, to ensure the precision, accuracy, and reproducibility of the results.

#### -Total Acidity

Total acidity was determined through acid-base titration. A 25,0 mL aliquot of *chicha de jora* was placed in a 100 mL Erlenmeyer flask and heated for approximately 30 seconds to

facilitate the release of volatile gases; the sample was then allowed to cool to an average temperature of  $28 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$ . For the titration, the indicator solution was prepared by adding 1,0 mL of 1 % phenolphthalein to 200,0 mL of distilled water that had been previously boiled, then transferring the solution to a beaker. Subsequently, 5,0 mL of the sample was combined with the indicator solution and titrated with sodium hydroxide (NaOH) until a persistent pale pink color appeared, indicating the endpoint of the reaction.

Total acidity was calculated and expressed as grams of acetic acid per liter (g/L) of sample, in accordance with the criteria established in the NTP 210.026:2007 (Instituto Nacional de Calidad, 2019). This procedure was conducted in triplicate to ensure the precision and reproducibility of the results.

#### *-Total Sugars*

To determine the sugar content, we used an ATAGO PAL-1 digital handheld refractometer (Japan), calibrated in °Brix (% w/w sucrose equivalent) and operating within a temperature range of  $10^{\circ}\text{C}$  to  $100^{\circ}\text{C}$ . Before each measurement, we carefully cleaned the device's optical surface with purified water to prevent any interference with the readings. We then applied approximately three drops of the sample (about 0,3 mL), taken directly from the fermentation tank, ensuring that the temperature remained between  $20^{\circ}\text{C}$  and  $25^{\circ}\text{C}$ , optimal conditions for accurate readings.

We recorded the total sugars content value directly from the instrument's display, repeating the measurement five consecutive times to ensure data reproducibility. We discarded the two most outlying values and averaged the remaining three measurements. This analysis adhered to the guidelines of the NTP 210.026:2007 (Instituto Nacional de Calidad, 2019).

#### *-Alcohol Content*

The alcohol content was measured using a Gay-Lussac alcoholmeter, which features a mercury bulb and a stem graduated from 0 % to 100 % v/v, calibrated at a standard temperature of  $20^{\circ}\text{C}$ . An aliquot of 80,0 mL of *chicha de jora* was taken and neutralized by adding 3,0 mL of 20 % NaOH until a color change indicated the complete neutralization of the present acids. Subsequently, the researchers conducted distillation on the neutralized sample and collected the distillate in a 100 mL graduated cylinder until a volume of 40,0 mL was reached. Distilled water was then added to achieve a total volume of 80,0 mL.

Once the solution temperature stabilized at  $20^{\circ}\text{C}$ , we carefully inserted the alcoholmeter into the graduated cylinder and recorded the flotation value corresponding to the volumetric percentage of alcohol (% v/v). This procedure was conducted in triplicate to ensure precision and reproducibility of the results.

## RESULTS

The findings regarding the determinations of alcohol content, total sugars, pH, and total acidity during the experimental period are presented. Table 3 below provides a detailed account of the values recorded for both study groups throughout the twelve-week analysis period.

**Table 3**

*General table of physicochemical results during the study period*

Days	Group	pH	Total Acidity (g/L)	Total Sugars (°Brix)	Alcohol Content (%v/v)
7	Control	3,12 ± 0,01	18,43 ± 0,13	7,36 ± 0,01	6,00 ± 0
	Experimental	3,12 ± 0,01	18,22 ± 0,07	7,93 ± 0,30	8,00 ± 0
14	Control	3,14 ± 0,01	21,08 ± 0,08	8,43 ± 0,04	8,00 ± 0
	Experimental	3,11 ± 0,01	20,95 ± 0,08	8,98 ± 0,09	8,00 ± 0
21	Control	2,52 ± 0,02	24,83 ± 0,13	8,40 ± 0,19	8,00 ± 0
	Experimental	2,50 ± 0,01	25,05 ± 0,08	8,37 ± 0,02	8,00 ± 0
28	Control	2,43 ± 0,02	26,47 ± 0,06	8,14 ± 0,25	8,00 ± 0
	Experimental	2,44 ± 0,01	26,30 ± 0,17	8,84 ± 0,08	8,00 ± 0
35	Control	2,44 ± 0,01	24,67 ± 0,06	8,51 ± 0,04	9,00 ± 0
	Experimental	2,41 ± 0,01	26,43 ± 0,06	8,66 ± 0,06	9,00 ± 0
42	Control	2,36 ± 0,02	27,30 ± 0,17	8,77 ± 0,08	8,00 ± 0
	Experimental	2,35 ± 0,01	28,33 ± 0,06	8,81 ± 0,11	8,00 ± 0
49	Control	2,41 ± 0,01	29,30 ± 0,20	8,24 ± 0,16	8,00 ± 0
	Experimental	2,36 ± 0,01	31,37 ± 0,25	8,40 ± 0,12	8,00 ± 0
56	Control	2,37 ± 0,01	32,97 ± 0,12	8,57 ± 0,09	9,00 ± 0
	Experimental	2,37 ± 0,01	34,23 ± 0,12	7,93 ± 0,15	8,00 ± 0
63	Control	2,38 ± 0,01	35,87 ± 0,27	8,46 ± 0,28	8,00 ± 0
	Experimental	2,35 ± 0,01	35,78 ± 0,15	8,39 ± 0,16	8,00 ± 0
70	Control	2,35 ± 0,01	41,31 ± 0,16	8,15 ± 0,01	8,00 ± 0
	Experimental	2,35 ± 0,01	38,56 ± 0,26	7,61 ± 0,06	8,00 ± 0
77	Control	2,35 ± 0,01	47,12 ± 0,27	8,72 ± 0,25	8,00 ± 0
	Experimental	2,41 ± 0,01	46,59 ± 0,27	8,31 ± 0,13	8,00 ± 0
84	Control	2,36 ± 0,01	58,90 ± 0,27	8,52 ± 0,04	8,00 ± 0
	Experimental	2,37 ± 0,01	58,90 ± 0,27	7,32 ± 0,13	7,00 ± 0

Note. pH = potential of hydrogen; °Brix = total soluble solids.

### Determination of physicochemical characteristics

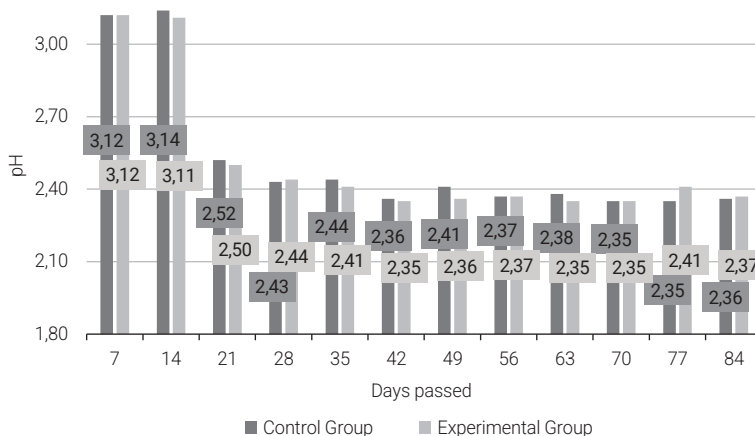
#### -pH

After conducting the necessary tests in both study groups, we determined an average pH of 2,52 ± 0,03 for the control group and 2,51 ± 0,03 for the experimental group, with no

statistically significant differences identified ( $p > 0,05$ ). These values reflect a distinctly acidic sensory profile, characteristic of fermented beverages such as *chicha de jora*. The slight negative variation noted toward the end of the experimental period likely results from minor fluctuations in fermentative activity. Figure 3 illustrates the evolution and stability of pH in both groups, confirming that packaging type did not significantly affect the pH over the 12-week evaluation period.

**Figure 3**

*pH value during storage*

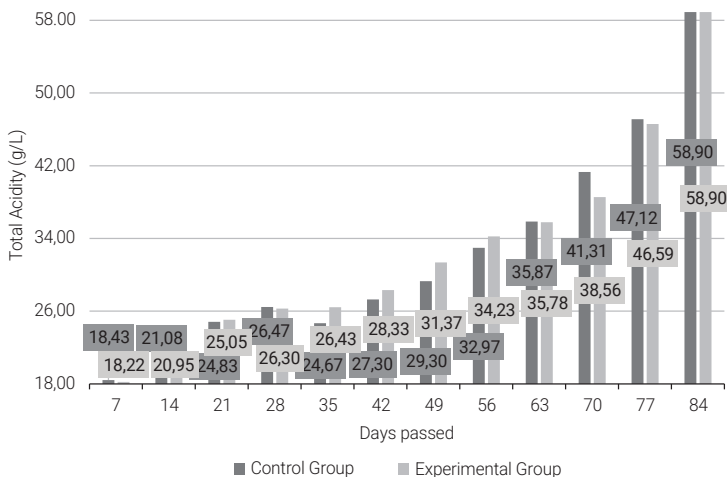


#### *-Total Acidity*

The total acidity values increased progressively over the 12-week analysis period. The control group demonstrated an average acidity of  $32,35 \pm 1,21$  g/L, while the experimental group showed an average of  $32,56 \pm 1,21$  g/L, with no statistically significant differences observed ( $p > 0,05$ ). Initially, total acidity measured  $18,43 \pm 0,13$  g/L in the control group and  $18,22 \pm 0,07$  g/L in the experimental group, ultimately reaching final values of  $58,9 \pm 0,27$  g/L for both groups. This trend reflects a sustained increase in acidic compounds during storage, as presented in Table 3. These findings suggest that the applied pasteurization did not fully eliminate the fermentative microbiota, permitting the residual activity of thermo-resistant microorganisms throughout the storage period. While this heat treatment reduces the microbial load, it does not ensure absolute sterility. Moreover, the increase in total acidity correlates with the reduction in pH, establishing an inverse relationship between these parameters. The evolution of total acidity demonstrated a consistent trend in both groups, as illustrated in Figure 4, indicating that the packaging type did not significantly influence the acidification dynamics during storage.

**Figure 4**

*Total acidity during storage*

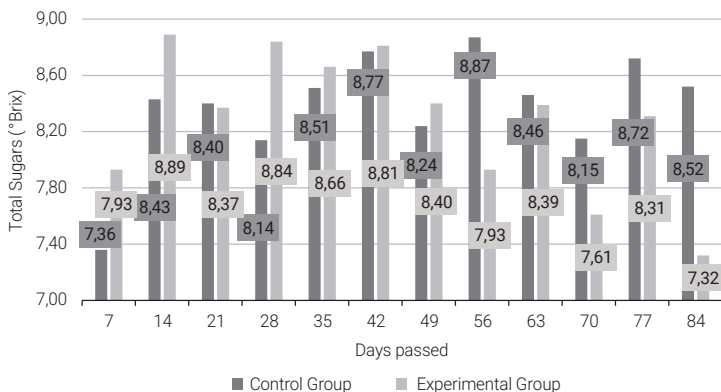


**- Total Sugars**

The analysis revealed that the experimental group exhibited a mean total sugars value of  $8,29 \pm 0,56$  °Brix, compared to a mean value of  $8,38 \pm 0,56$  °Brix observed in the control group. Although a portion of the initial sugar was metabolized during fermentation, the persistence of values near 8 °Brix indicates that the substrate was not entirely depleted. This level of total sugars imparts a slight sweetness that balances the product’s inherent acidity. Figure 5 illustrates the fluctuations in °Brix values throughout storage; however, these values remained within a relatively narrow range of 7,3 to 8,9 °Brix, demonstrating no sustained upward or downward trend and indicating moderate variation in total soluble solids.

**Figure 5**

*Total sugars during storage*



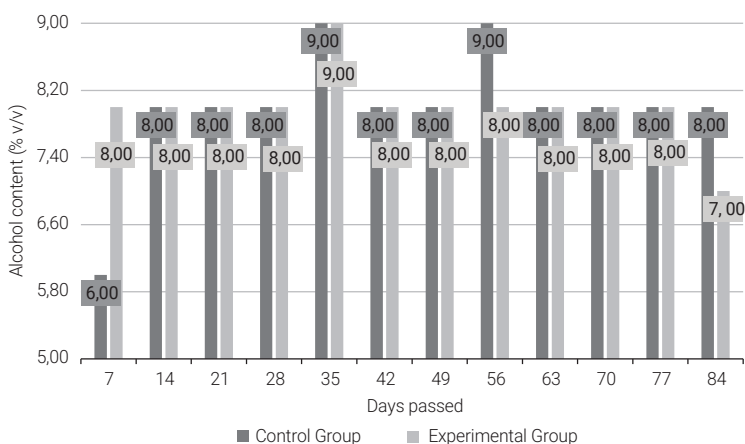
### -Alcohol content

The analysis of alcohol content revealed an average concentration of 8,0% v/v in both the control and experimental groups, with a standard deviation of  $\pm 0,71$ . The fermentation process preceding pasteurization accounts for ethanol production, primarily involving yeasts of the genus *Saccharomyces* in cereal-based fermentation systems. These yeasts are recognized for their capacity to convert glucose, fructose, and sucrose into ethanol and carbon dioxide (Ciani & Comitini, 2015). However, this study did not perform specific microbiological identification; therefore, the reference to *Saccharomyces* relies on existing literature concerning similar fermentation processes. While sugars typically decrease during fermentation, the slight stability observed in total sugars values may result from the partial hydrolysis of residual polysaccharides. This progressive degradation releases fermentable sugars that offset the consumption of simple sugars by the yeasts (Barbosa Piló et al., 2018). In this context, the residual polysaccharides primarily originate from corn starch, consisting of amylose and amylopectin, whose slow degradation has been documented as a factor influencing the availability of fermentable sugars in cereal-based processes (Liu et al., 2024).

Therefore, the relationship between total sugars and alcohol content is not strictly direct. Ethanol production occurred during the fermentation stage before pasteurization, achieving concentrations near 8,0% v/v. Subsequently, during storage, the alcohol content remained stable ( $p > 0,05$ ), as illustrated in Figure 6, indicating no significant fermentation activity. While the °Brix values varied, these fluctuations do not necessarily indicate additional ethanol production; rather, they reflect changes in the concentration of total soluble solids.

**Figure 6**

*Alcohol content during storage*



## DISCUSSION

This analysis aimed to experimentally demonstrate the feasibility of using laminated cartons for packaging *chicha de jora* by comparing the physicochemical characteristics of the control group (glass containers) with those of the experimental group (laminated cartons). It is important to emphasize that no prior studies have addressed this specific topic; therefore, all information presented here is original and contributes to the advancement of *chicha de jora* production and commercialization.

The results revealed consistent variations among the study groups; however, these variations did not reach statistical significance ( $p > 0,05$ ), suggesting that the packaging material did not considerably influence the evolution of the evaluated variables. The pH displayed average values of  $2,51 \pm 0,03$ , a characteristic indicative of fermented beverages with a high degree of acidity, which correlates with the activity of fermentative microorganisms. From a microbiological perspective, pH values below 4 inhibit the growth of pathogenic microorganisms, thereby enhancing product safety (Lund et al., 2020). These findings align with those reported by Ara Rojas et al. (2018) and Periche Pérez (2018), who assert that the decrease in pH is directly correlated with the production of organic acids, primarily lactic, acetic, and succinic acids, generated during fermentation prior to heat treatment by microorganisms such as *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus* sp., and *Acetobacter* sp. In this study, since the ethanol content remained stable during storage, researchers interpret the decrease in pH as a result of previously formed acid compounds and potential adjustments in the system's chemical equilibrium, rather than from subsequent active fermentation. This phenomenon also accounts for the gradual increase in total acidity, with values falling within the acceptable range for fermented beverages as outlined in the Instituto Nacional de Calidad (NTP 210.026:2007).

Total acidity consistently increased from  $18,43 \pm 0,13$  g/L to  $58,9 \pm 0,27$  g/L throughout the analysis period, indicating the accumulation of acidic compounds in the system. Researchers primarily generated these acids during the fermentation phase prior to heat treatment, during which yeasts and lactic acid bacteria typically associated with cereal fermentation play a significant role (Liang et al., 2020). The study did not perform specific microbiological identification; therefore, the references to yeasts and lactic acid bacteria rely on existing literature regarding traditional cereal fermentations. It is important to distinguish between pH and titratable acidity. pH measures the concentration of free protons ( $H^+$ ) in solution, while titratable acidity quantifies the total concentration of organic acids present, irrespective of their degree of dissociation. Although these two parameters are interrelated, they are chemically distinct. During storage after heat treatment, the ethanol content remained constant at 8,0 % v/v ( $p > 0,05$ ), suggesting a lack of significant fermentation activity. Given this context, the observed variation in total acidity does not necessarily indicate further microbial production; instead, it may reflect adjustments in the system's chemical balance or the redistribution of previously formed acid-base species.

Consequently, both types of packaging effectively maintained conditions conducive to preserving the chemical quality of *chicha de jora* during storage.

Regarding the total sugars content, the average values were found to be 8,38 °Brix for the control group and 8,29 °Brix for the experimental group, resulting in a minimal variation of 0,09 °Brix. This slight variation suggests that the type of packaging has no significant effect on the overall concentration of soluble compounds during storage. Furthermore, it is important to recognize that °Brix measures total soluble solids, rather than exclusively fermentable sugars. Therefore, the observed stability can be attributed to a balance between the reduction of previously metabolized simple sugars and the presence of other soluble compounds produced during fermentation prior to heat treatment.

With respect to alcohol content, both groups exhibited an average of  $8,0 \pm 0,71$  % v/v, with no statistically significant differences identified between them. This measurement slightly exceeds the range established for other traditional fermented beverages, such as cider (4,0-7,0% v/v), as outlined in NTP 210.026:2007, which suggests efficient fermentation. During the fermentation phase, yeasts of the genus *Saccharomyces* predominantly converted sugars into ethanol, with their metabolic activity transforming glucose, fructose, and a portion of sucrose into ethyl alcohol and carbon dioxide (Ciani & Comitini, 2015). Following this phase, the pasteurization treatment effectively halted microbial activity, allowing the generated metabolites to remain within the system. Within this context, an inverse relationship between total sugars content and alcohol content emerged, consistent with the characteristics of fermentation processes, wherein yeast consumption of sugars results in the production of ethanol and carbon dioxide.

In relation to the aforementioned findings, this study demonstrates that no statistically significant variation exists in the physicochemical characteristics between the groups evaluated. The outcome supports the suitability and safety of laminated carton packaging for preserving *chicha de jora*. A primary limitation of this research is the scarcity of studies analyzing the physicochemical characteristics of *chicha de jora*, as most existing literature focuses on its production process. Consequently, this lack of data hampers the ability to compare the study's results, thereby affecting their reliability. Future research should focus on measuring the variables included in this study to validate these results. Additionally, expanding the number of variables would be beneficial to identify any factors that might contraindicate the use of laminated cartons as packaging for *chicha de jora*.

## CONCLUSIONS

After performing physicochemical analyses for this study, the comparative evaluation between the control group (glass packaging) and the experimental group (laminated carton packaging) revealed no statistically significant differences ( $p > 0,05$ ). The average parameters for the control group were pH  $2,52 \pm 0,03$ , total acidity  $32,35 \pm 1,21$  g/L, total sugars

8,38 ± 0,56 °Brix, and alcohol content 8,00 ± 0,71 % vol. On the other hand, the experimental group showed the following results: pH 2,51 ± 0,03, total acidity 32,56 ± 1,21 g/L, total sugars 8,29 ± 0,56 °Brix, and alcohol content 8,00 ± 0,71% vol.

A comparison with the parameters established by NTP 210.026:2007 (Cider) indicated that the pH values obtained fell below the reference range, the total sugars content exceeded the established limit, and the alcohol content slightly surpassed the permitted value. These distinctions confirm that *chicha de jora*, as a traditional fermented beverage, has a unique physicochemical profile distinct from that of industrially produced fermented beverages such as cider. In this context, the regulatory comparison functioned solely as a technical reference and did not serve as a direct criterion for conformity assessment.

The comparative analysis revealed that the packaging type did not induce significant variations in the physicochemical parameters evaluated during the experimental period. Consequently, laminated carton packaging emerges as a technically viable alternative for preserving *chicha de jora*, demonstrating behavior comparable to that of traditional glass containers.

In conclusion, the adoption of laminated carton packaging for *chicha de jora* offers operational advantages in the realms of packaging, storage, and transportation processes, without affecting its physicochemical characteristics. These results provide substantial technical evidence supporting the feasibility of implementing this packaging type for large-scale production while maintaining the beverage's physicochemical identity.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

## AUTHOR CONTRIBUTION

**Marcos Luis Humberto Sánchez Ferrer Marengo:** Original draft writing, writing-revision and editing, conceptualization, methodology, research, visualization, and supervision. **Marco Antonio Guardamino Castro:** Original draft writing, writing-revision and editing, conceptualization, methodology, research, visualization, and supervision. **Marcos Fernando Ruiz-Ruiz:** Revision and editing, conceptualization, methodology, visualization, and supervision.

## DECLARATION ON THE USE OF GENERATIVE IA

The authors used generative AI tools solely to improve the writing, grammar, and clarity of the manuscript. The interpretation of the results, analysis, and conclusions correspond exclusively to the authors.

## REFERENCES

- Aguirre Logrono, H. J. (2009). *Propuesta de una receta estándar para la elaboración de la chicha en la provincia de Chimborazo* [Master's thesis, Equinoccial Technological University]. UTE Repository. <https://hdl.handle.net/20.500.13066/11504>
- Ara Rojas, S., Hurtado Alendes, A., Barnett Mendoza, E., Celi Saavedra, L., & Ramos Escudero, M. (2018). Optimización de parámetros del proceso de elaboración de chicha de jora. *Campus*, 23(25), 11-28. <https://doi.org/10.24265/campus.2018.v23n25.01>
- Azanza, C., & Chacón, D. (2018). *Análisis cultural y sensorial de la chicha de jora elaborada en la sierra norte ecuatoriana (Imbabura y Pichincha)* [Bachelor thesis, San Francisco de Quito University]. USFQ Digital Repository. <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/7335>
- Barbosa Piló, F., Carvajal-Barriga, E. J., Guamán-Burneo, M. C., Portero-Barahona, P., Morato Dias, A. M., Daher de Freitas, L. F., Oliveira Gomes, F. de C., & Rosa, C. A. (2018). *Saccharomyces cerevisiae* populations and other yeasts associated with indigenous beers (*chicha*) of Ecuador. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49(4), 808-815. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2018.01.002>
- Bassi, D., Orrù, L., Cabanillas Vasquez, J., Cocconcelli, P. S., & Fontana, C. (2020). Peruvian *chicha*: A focus on the microbial populations of this ancient maize-based fermented beverage. *Microorganisms*, 8(1), 93. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8010093>
- Bolzon, G., Cornaggia, G., Shahmardani, M., Giampieri, A., & Mameli, A. (2015). Aluminum laminates in beverage packaging: Models and experiences. *Beverages*, 1(3), 183-193. <https://doi.org/10.3390/beverages1030183>
- Brock, A., & Williams, I. D. (2020). Life cycle assessment of beverage packaging. *Detritus*, 13, 47-61. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.14025>
- Camacho, L. (2019). *Evaluación del efecto de la ozonización en la vida útil de chicha de jora envasada* [Bachelor thesis, Micaela Bastidas National University of Apurímac]. UNAMBA Institutional Repository. <https://hdl.handle.net/20.500.14195/201>
- Chunqui, B. (2019). *Optimización del proceso de elaboración de la chicha de jora* [Bachelor thesis, National University of Trujillo]. UNT Institutional Repository. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/13459>
- Ciani, M., & Comitini, F. (2015). Yeast interactions in multi-starter wine fermentation. *Current Opinion in Food Science*, 1, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2014.07.001>

- Ciravegna, E. (2020). Repensar los envases en tiempos de crisis: implicancias éticas y enfoque sistémico en el diseño de packaging. *RChD: Creación y pensamiento*, 5(9), 1-6. <https://doi.org/10.5354/0719-837X.2020.59536>
- De Florio Ramírez, E. (2019). Elaboración tradicional de chicha de jora. *Ciencia & Desarrollo*, 1, 92-96. <https://doi.org/10.33326/26176033.1995.1.26>
- Dirección General de Salud Ambiental, & Ministerio de Salud del Perú. (2008). *Actualización de la Resolución Ministerial N.º 615-2003-SA/DM*. [https://www.saludarequipa.gob.pe/desa/archivos/Normas\\_Legales/alimentos/RM591MINSANORMA.pdf](https://www.saludarequipa.gob.pe/desa/archivos/Normas_Legales/alimentos/RM591MINSANORMA.pdf)
- Fentie, E. G., Jeong, M., Emire, S. A., Demsash, H. D., Kim, M. A., Jeon, H.-J., Lee, S.-E., Tagele, S. B., Park, Y.-J., & Shin, J.-H. (2022). Physicochemical properties, antioxidant activities, and microbial communities of Ethiopian honey wine, *Tej. Food Research International*, 152, 110765. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110765>
- Ferrara, C., & De Feo, G. (2020). Comparative life cycle assessment of alternative systems for wine packaging in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120888. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120888>
- Gernet, M. V., Sevostyanova, E. M., Soboleva, O. A., Kovaleva, I. L., & Gribkova, I. N. (2019). Methodological approaches to evaluating beer and non-alcoholic products shelf life: Physicochemical parameters including pH, titratable acidity, sugars, and alcohol content. *Journal of Beverage Analysis*, 2(3), 13-16. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-3-13-16>
- Instituto Nacional de Calidad. (2019). *Bebidas alcohólicas. Sidra. Requisitos* (NTP 210.026:2007, 2.ª ed.).
- Kirwan, M. J. (2005). Paperboard-based liquid packaging. In M. J. Kirwan (Ed.), *Paper and Paperboard Packaging Technology* (pp. 386-413). Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470995877>
- Liang, Z., Lin, X., He, Z., Li, W., Ren, X., & Lin, X. (2020). Dynamic changes of total acid and bacterial communities during the traditional fermentation of Hong Qu glutinous rice wine. *Electronic Journal of Biotechnology*, 43, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2019.12.002>
- Liu, S., Hu, J., Zhong, Y., Hu, X., Yin, J., Xiong, T., Nie, S., & Xie, M. (2024). A review: Effects of microbial fermentation on the structure and bioactivity of polysaccharides in plant-based foods. *Food Chemistry*, 440, 137453. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137453>
- Lund, P. A., De Biase, D., Liran, O., Scheler, O., Pereira Mira, N., Cetecioglu, Z., Noriega Fernández, E., Bover-Cid, S., Hall, R., Sauer, M., & O'Byrne, C. (2020). Understanding

how microorganisms respond to acid pH is central to their control and successful exploitation. *Frontiers In Microbiology*, 11, 556140. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.556140>

Ministerio de Salud del Perú. (1998). *Decreto Supremo N.º 007-98-SA. Reglamento sobre vigilancia y control sanitario de alimentos y bebidas*. <https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/256394-007-98-sa>

Olsmats, C., Nilsson, B., & Pousette, S. (2015). Perceptions of sustainability and functional aspects on liquid carton board packaging materials versus competing materials for juice applications in Sweden. *Beverages*, 1(3), 194-203. <https://doi.org/10.3390/beverages1030194>

Periche Pérez, J. (2018). Contenido de aminos biógenas (histamina y tiramina) y su relación con características fisicoquímicas en muestras de chicha de jora elaboradas en la provincia de Abancay, Apurímac. *Industrial Data*, 21(2), 35-46. <https://doi.org/10.15381/idata.v21i2.15601>

Seluy, L. G., Comelli, R. N., Benzzo, M. T., & Isla, M. A. (2018). Feasibility of bioethanol production from cider waste. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(9), 1493-1501. <https://doi.org/10.4014/jmb.1801.01044>

Techakanon, C., & Sirimuangmoon, C. (2020). The effect of pasteurization and shelf life on the physicochemical, microbiological, antioxidant, and sensory properties of rose apple cider during cold storage. *Beverages*, 6(3), Article 43. <https://doi.org/10.3390/beverages6030043>

Thompson-Witrick, K. A., Pitts, E. R., Nemenyi, J. L., & Budner, D. (2021). The impact packaging type has on the flavor of wine. *Beverages*, 7(2), 36. <https://doi.org/10.3390/beverages7020036>

Turrado, J., Dávalos, M. F., Fuentes, F. J., & Saucedo, A. R. (2012). Envases de cartón para líquidos como fuente de fibra secundaria. *Información Tecnológica*, 23(3), 59-66. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000300008>

Vargas-Yana, D., Aguilar-Morón, B., Pezo-Torres, N., Shetty, K., & Gálvez Ranilla, L. (2020). Ancestral Peruvian ethnic fermented beverage “chicha” based on purple corn (*Zea mays* L.): Unraveling the health-relevant functional benefits. *Journal of Ethnic Foods*, 7, Article 35. <https://doi.org/10.1186/s42779-020-00063-3>

# SELECCIÓN ÓPTIMA DE PROVEEDORES MEDIANTE ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD Y COSTOS BASADO EN LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL APLICADO AL SECTOR AUTOMOTOR

JUAN MANUEL IZAR LANDETA\*

<https://orcid.org/0000-0002-3187-6481>

Facultad de Ingeniería Industrial,  
Instituto Tecnológico Superior de Rioverde, México

IVANNA LÓPEZ REYNA

<https://orcid.org/0009-0000-2534-9223>

Facultad de Ingeniería Industrial,  
Instituto Tecnológico Superior de Rioverde, México

Recibido: 17 de marzo del 2026 / Aceptado: 10 de abril del 2026

Publicado: 15 de junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8672>

**RESUMEN.** Se presenta la aplicación de la distribución Weibull de dos parámetros al caso de evaluar tres proveedores para determinar cuál de ellos es el mejor. Con base en 20 tiempos de falla de cada proveedor, se estiman los parámetros de forma y escala de Weibull mediante el uso de rangos medios para dos proveedores y rangos medianos para el otro, en función de la opción que produjo el mejor ajuste mediante regresión por mínimos cuadrados; con ello, se estima el tiempo medio entre fallas (MTBF, horas) y la confiabilidad de cada proveedor, para finalmente cuantificar el costo anual en pesos por el consumo de componentes. Se concluye que el mejor proveedor es el segundo, al obtener el mayor MTBF, con 384,6 horas, superando al proveedor 1 en un 28,5 % y al proveedor 3 en un 24,2 %. Asimismo, presenta el menor costo anual de \$ 27 579, a pesar de que su precio unitario es mayor.

**PALABRAS CLAVE:** distribución Weibull / selección de proveedores / tiempo medio entre fallas / confiabilidad / parámetro de forma / parámetro de escala

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: [juan.il@rioverde.tecnm.mx](mailto:juan.il@rioverde.tecnm.mx); [ivanna.lr@rioverde.tecnm.mx](mailto:ivanna.lr@rioverde.tecnm.mx)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## OPTIMAL SUPPLIER SELECTION THROUGH RELIABILITY AND COST ANALYSIS BASED ON THE WEIBULL DISTRIBUTION APPLIED TO THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

ABSTRACT. This paper presents the application of the two-parameter Weibull distribution to a case study to evaluate three suppliers and determine which is the best. Based on each supplier's failure times, the Weibull shape and scale parameters are estimated, along with the mean time between failures (MTBF) and reliability curve for each supplier. Finally, the annual cost of component consumption is quantified. It is concluded that the second supplier is the best option, as it achieved the highest MTBF of 384,6 hours, exceeding supplier 1 by 28,5 % and supplier 3 by 24,2 %. Additionally, it presented the lowest annual cost of \$ 27 579, despite having the highest unit price.

KEYWORDS: Weibull distribution / supplier selection / mean time between failures / reliability / shape parameter / scale parameter

## INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería y la administración, la selección de proveedores es un proceso crítico, ya que impacta directamente en la toma de decisiones organizacionales. Desde hace más de seis décadas, Dickson (1966) identificó 23 criterios clave, entre los que destacan la calidad, la entrega, las garantías, el desempeño histórico, la atención de quejas, la capacidad productiva, los precios y la situación financiera del proveedor. Actualmente, estos criterios han sido agrupados en siete categorías: económicas/financieras, de calidad, logísticas, técnicas, de sustentabilidad, de riesgo y estratégicas (Cooper, 2024), lo que refleja una evolución hacia un enfoque más holístico en comparación con décadas anteriores, donde predominaban los factores económicos.

Por su parte, Abuzaid et al. (2024) sugieren aplicar seis factores en el proceso de selección de proveedores: ecoamigabilidad, calidad, flexibilidad, relación, entrega y aspectos económicos, destacando que variables como la flexibilidad, el precio, la entrega y las prácticas ecológicas influyen en el desempeño organizacional. En la misma línea, Onukwulu et al. (2024) resaltan la importancia de la sustentabilidad al integrarse criterios ambientales, sociales y de gobernanza en sus procesos de selección. Señalan que los avances tecnológicos como la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático han transformado este proceso, ya que permiten análisis predictivos, monitorización en tiempo real y una mayor transparencia.

El objetivo de este trabajo es determinar el mejor proveedor entre tres opciones del sector automotor, considerando dos criterios: calidad (tiempo entre fallas) y costo. Para ello, se emplea la distribución de Weibull de dos parámetros, con el fin de estimar el tiempo entre fallas de los componentes de cada proveedor y, con base en esto, determinar el consumo anual de componentes.

La distribución de Weibull se ha consolidado como una herramienta robusta para el análisis de confiabilidad, mantenimiento predictivo y estimación de vida útil en sistemas industriales. Su aplicación ha sido ampliamente documentada en maquinaria industrial, sistemas eléctricos, *software* y procesos de manufactura, lo que ha permitido estimar tasas de falla, confiabilidad y tiempos medios entre fallas (Anjos, 2008; Ferrisi et al., 2025; Jardine & Tsang, 2021; Qin et al., 2023).

Safari et al. (2025) utilizan la distribución de Weibull de tres parámetros para el análisis de datos de confiabilidad, y proponen un método robusto de estimación de sus parámetros mediante la transformación integral de probabilidad (PITE), con el objetivo de obtener estimaciones más precisas cuando los datos contienen valores atípicos. La aplicación de su estudio se implementó en el análisis de confiabilidad de materiales, específicamente en la resistencia mecánica de superficies de vidrio envejecido y fibras de carbono.

En el contexto de la evaluación de proveedores, diversos estudios han incorporado el análisis de la vida útil como un criterio importante para su comparación y validación, en función del desempeño de los componentes en operación (Shu et al., 2022; Thavorn & Sudasna-Na-Ayudhya, 2022).

Por otra parte, Wang et al. (2025) realizaron un análisis de los conjuntos de datos de fallos de sistemas de *big data* de código abierto y propusieron un modelo de fiabilidad de *software* basado en la distribución Weibull, el cual establece las bases para simular el proceso de detección de fallos en este tipo de *softwares*.

Para abordar las desventajas del plan de muestreo único, proponen un sistema de muestreo de conmutación rápida con calificación de rendimiento de vida útil bajo una distribución de Weibull con censura de fallos. Este sistema no solo reduce significativamente la cantidad de fallas que deben observarse en las pruebas de vida útil, sino que también presenta una curva característica de operación con mayor capacidad discriminatoria para la disposición de lotes, lo que representa beneficios económicos para las organizaciones (Shu et al., 2021).

En aplicaciones prácticas, la distribución de Weibull ha sido utilizada para analizar datos de fallas reales y apoyar la toma de decisiones en mantenimiento y operación de sistemas industriales. A través de estos estudios, es posible estimar la vida útil de componentes y establecer criterios para su reemplazo, lo que contribuye a mejorar la confiabilidad y la eficiencia de los procesos (Gallegos Londoño et al., 2022; Gondres Torné et al., 2013; Okoh et al., 2017; Prasetya et al., 2023).

En otros ámbitos, Yu (2024) empleó la distribución Weibull de tres parámetros para analizar la confiabilidad del tubo de Pitot en aeronaves ARJ21 y, de esta manera, demostró la fiabilidad operativa del sistema de aeronaves.

En disciplinas como la medicina y la ingeniería de confiabilidad, la distribución de Weibull juega un papel importante, al ser una de las más utilizadas por su flexibilidad; sin embargo, presenta limitaciones que han impulsado el desarrollo de nuevas extensiones. Entre ellas, destacan modelos como la distribución Weibull modificada (MWD) y la nueva distribución Weibull extendida (NEWD), así como propuestas recientes, como la GNEWD, que ofrece mayor adaptabilidad y ha demostrado buen desempeño en datos clínicos (Al-Moisheer et al., 2025). De manera similar, la distribución E-Weibull ha sido propuesta para mejorar el ajuste en aplicaciones de ingeniería, donde ha mostrado resultados superiores en el análisis de datos de resistencia de materiales (Alshanbari et al., 2024).

Por su parte, Wu et al. (2007) consideran el análisis de fallas y riesgo en proveedores, en el que Weibull se aplicó para modelar tiempos entre fallas o incumplimientos.

Wei et al. (2025) emplean la distribución de Weibull y la distribución del tamaño de la muestra COMP-Bessel, lo que da como resultado un nuevo modelo denominado WCOMPB.

Este nuevo modelo cuenta con cinco parámetros ( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$ ,  $v$ ,  $\alpha$ ). El modelo fue puesto a prueba en estudios de casos relacionados con fallos en el sistema de aire acondicionado de un avión y, además, con intervalos de tiempo entre terremotos sucesivos. Asimismo, se analiza la estimación de máxima probabilidad de los parámetros y su rendimiento, proporcionando ajustes razonables a los conjuntos de datos.

Singh y Liao (2025) aplicaron Weibull junto con Promethee extendido al caso de selección de proveedores para modelar la incertidumbre en las evaluaciones.

Por otro lado, Plaskitt et al. (2024) compararon las distribuciones Weibull y Lognormal para modelar la vida por fatiga en tres conjuntos de datos. Encontraron que, en datos no homogéneos, la distribución Weibull es más adecuada para estimar la vida útil, mientras que, en conjuntos más grandes y específicos, la Lognormal ofrece un mejor ajuste. En general, Weibull resulta más conveniente para muestras pequeñas y heterogéneas.

Sulewski y Drapella (2025) proponen el modelo Weibull-sf, una modificación de la distribución Weibull que sustituye el parámetro de forma por una función de forma, lo que incrementa su flexibilidad. Este modelo, basado en el análisis de 165 variantes de Weibull, permite representar comportamientos complejos, como tasas de falla tipo bañera y distribuciones bimodales, y sus autores sugieren el uso del método de mínimos absolutos para su estimación debido a dificultades con el método de máxima verosimilitud.

## METODOLOGÍA

Este estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, ya que se emplean modelos matemáticos y estadísticos para el análisis de datos. Además, se cuenta con un tipo de investigación aplicada, puesto que se busca resolver un problema específico relacionado con la selección de proveedores en un contexto automotor.

Asimismo, el alcance de la investigación es correlacional, ya que se analizan los tiempos de falla de los proveedores mediante modelos probabilísticos, con el fin de establecer criterios de comparación.

En cuanto al diseño de la investigación, es no experimental debido a que no se manipulan variables de manera directa, sino que se analizan datos existentes mediante herramientas estadísticas.

Para el análisis, se emplea la distribución Weibull, que es un modelo estadístico usado para describir los tiempos de falla de componentes o equipos de un sistema y, en este caso concreto, es la que se aplica para llegar a seleccionar al mejor proveedor.

Se utiliza ampliamente para planear el mantenimiento en muchos sectores industriales.

Por lo general, se aplica para obtener el tiempo ( $t$ ) en que un componente o un equipo presentan fallas.

La función de densidad de probabilidad (FDP),  $f(t)$ , se obtiene mediante la siguiente ecuación (Jardine & Tsang, 2021):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

En la ecuación,  $\beta$  es el parámetro de forma, que indica el comportamiento de las fallas en el tiempo;  $\eta$  es el parámetro de escala, definido como la vida característica del componente, es decir, el tiempo en el cual el 63,2 % de las unidades habrá fallado; y  $\gamma$  es el parámetro de localización.

En este caso, se aplica la ecuación con dos parámetros,  $\beta$  y  $\eta$ , que es la misma fórmula anterior con  $\gamma$  igual a cero, lo que implica que el conteo inicia a tiempo cero y las fallas pueden suceder desde el inicio.

Por su parte, para  $\beta$ , el parámetro de forma, existen tres posibilidades:

- Si  $\beta < 1$ , la tasa de fallas  $\lambda(t)$  dada por la ecuación (4) decrece de manera monótona, a lo que se le denomina la fase de mortalidad infantil, ya que las fallas se presentan por defectos de manufactura.
- Si  $\beta = 1$ , la tasa de fallas es constante en el tiempo y la distribución de Weibull equivale a la exponencial.
- Si  $\beta > 1$ , la tasa de fallas presenta un incremento inicial hasta un punto máximo y después disminuye, lo cual implica que las fallas se deben por deterioro o desgaste, por el uso de los componentes.

Según Jardine y Tsang (2021), la función de distribución acumulada de fallas  $F(t)$ , también denominada desconfiabilidad, viene dada por la siguiente expresión matemática:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

La confiabilidad del sistema  $R(t)$  se estima con la siguiente ecuación:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3)$$

Y la tasa de fallas  $\lambda(t)$  se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

Otro indicador útil es el tiempo promedio entre dos fallas consecutivas (MTBF), el cual puede calcularse con la siguiente expresión matemática:

$$MTBF = \eta \Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \quad (5)$$

Siendo  $\Gamma$  la función gamma de  $(1+1/\beta)$ .

A continuación, se describe el método gráfico clásico, en el cual se obtienen, a partir de datos empíricos de los tiempos en que se presentan las fallas, los parámetros  $\beta$  y  $\eta$ , con los cuales será posible estimar la confiabilidad  $R(t)$ , la cual resulta muy importante para orientar la toma de decisiones sobre el mantenimiento de un sistema dado.

En primer lugar, se obtienen los datos correspondientes a los tiempos de ocurrencia de las fallas del componente bajo estudio, los cuales se ordenan de manera ascendente.

Luego, se obtiene la función de desconfiabilidad  $F(t)$ , que es el complemento de la confiabilidad  $R(t)$ , dada por la ecuación (2) y que puede obtenerse mediante las dos fórmulas siguientes:

Para rangos medianos:

$$F(t) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad (6)$$

Siendo  $i$  el número de orden del dato en cuestión y  $n$  el número total de datos.

Para rangos medios:

$$F(t) = \frac{i}{n + 1} \quad (7)$$

Ambas aproximaciones de probabilidad son buenas opciones para la estimación de la función acumulada de fallas  $F(t)$ .

Después, se calcula, para cada dato, el logaritmo natural del tiempo de falla, el cual corresponderá al eje  $x$  del gráfico que debe construirse para obtener los parámetros  $\beta$  y  $\eta$ :

$$x = \text{Ln}(t) \quad (8)$$

Los valores del eje  $y$  de dicho gráfico se calculan con la siguiente fórmula:

$$y = \text{Ln}[-\text{Ln}(R(t))] \quad (9)$$

A continuación, se construye el gráfico de  $x$  versus  $y$ . A partir de la línea recta obtenida mediante mínimos cuadrados, se estima la pendiente  $m$  y la ordenada al origen  $b$ , que son calculadas mediante las siguientes ecuaciones:

$$m = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (10)$$

$$b = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum xy \sum x}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (11)$$

En las ecuaciones,  $n$  es el número de observaciones, mientras que los demás términos son las sumatorias de  $y$ , de  $x$ , de  $x^2$  y de los productos  $xy$ . De esta manera, la pendiente  $m$  corresponde al parámetro de forma  $\beta$ , mientras que  $b$  se relaciona con el parámetro de escala  $\eta$ .

De acuerdo con Jardine y Tsang (2021), la pendiente  $m$  de la recta es el valor de  $\beta$ , mientras que el valor de  $\eta$  se estima con la siguiente ecuación:

$$\hat{\eta} = e^{\left(\frac{-b}{m}\right)} \quad (12)$$

Se recomienda obtener las rectas utilizando ambas ecuaciones (6 y 7), y seleccionar aquella que presente el mejor ajuste mediante mínimos cuadrados, el cual se evalúa con el coeficiente de determinación  $R^2$ .

Esto se aplicará en el caso de estudio para seleccionar al mejor proveedor a partir de los datos de prueba que se obtengan sobre la duración de los componentes hasta su falla, y se elegirá aquel que presente los mejores indicadores de confiabilidad y de tiempo medio entre fallas.

### Aplicación al caso de los tres proveedores

Para el caso de los proveedores, se recopilaron 20 datos correspondientes al tiempo entre fallas de un componente específico de un equipo de procesos ubicado en una planta automotriz, el cual fue suministrado por tres proveedores fabricantes.

Las pruebas consistieron en registrar el tiempo de operación de cada componente hasta la ocurrencia de una falla asociada al desgaste mecánico y repetir el procedimiento hasta completar el número de observaciones requeridas por proveedor. Para cada uno se recopilaron 20 observaciones, considerando un muestreo no probabilístico por conveniencia debido a la disponibilidad de datos en condiciones reales de operación.

Posteriormente, los datos recolectados de cada proveedor, que son independientes, se organizaron y sintetizaron en la Tabla 1 para su análisis mediante la distribución Weibull.

**Tabla 1**

*Datos de los tiempos entre fallas de los tres proveedores*

Orden	Tiempo de falla, horas		
	Proveedor 1	Proveedor 2	Proveedor 3
1	186	222	200
2	198	245	225
3	205	266	240
4	222	288	264

(continúa)

(continuación)

Orden	Tiempo de falla, horas		
	Proveedor 1	Proveedor 2	Proveedor 3
5	226	301	286
6	234	311	287
7	248	326	295
8	266	343	299
9	275	364	303
10	286	378	303
11	299	390	310
12	303	400	311
13	312	422	313
14	326	438	321
15	343	454	335
16	358	475	346
17	378	496	366
18	401	518	375
19	445	523	398
20	475	540	423

Nota. Elaboración propia con base en datos de una empresa.

Para cada proveedor se debe obtener su confiabilidad  $R(t)$  y el tiempo promedio entre fallas MTBF, a fin de determinar cuál de ellos debe seleccionarse con base en su tiempo entre fallas y en criterios económicos.

La empresa opera en promedio 6700 horas anuales, y los precios que ofertan los proveedores son los siguientes:

**Tabla 2**

*Precios de cada proveedor*

Proveedor	Precio, \$/unidad
1	1350
2	1585
3	1420

Nota. Elaboración propia con base en los datos de la empresa.

## RESULTADOS

Para cada proveedor debe realizarse el procedimiento descrito en la metodología, a fin de obtener los parámetros  $\beta$  y  $\eta$ , a partir de ellos, obtener la curva de confiabilidad  $R(t)$  en función del tiempo, así como el tiempo medio entre fallas.

Esto se ilustra para el caso del primer proveedor, para el cual en la Tabla 3 se sintetizan los valores de  $F(t)$ ,  $\ln(t)$  y  $\ln(-\ln R(t))$ . La función  $F(t)$  se obtuvo mediante la ecuación (7) para rangos medios.

**Tabla 3**

*Valores para el caso del primer proveedor*

Orden	Dato (t)	F(t)	Ln (t)	Ln(-Ln R(t))
1	186	0,048	5,226	-3,020
2	198	0,095	5,288	-2,302
3	205	0,143	5,323	-1,870
4	222	0,190	5,403	-1,554
5	226	0,238	5,421	-1,302
6	234	0,286	5,455	-1,089
7	248	0,333	5,513	-0,903
8	266	0,381	5,583	-0,735
9	275	0,429	5,617	-0,581
10	286	0,476	5,656	-0,436
11	299	0,524	5,700	-0,298
12	303	0,571	5,714	-0,166
13	312	0,619	5,743	-0,036
14	326	0,667	5,787	0,094
15	343	0,714	5,838	0,225
16	358	0,762	5,881	0,361
17	378	0,810	5,935	0,506
18	401	0,857	5,994	0,666
19	445	0,905	6,098	0,855
20	475	0,952	6,163	1,113

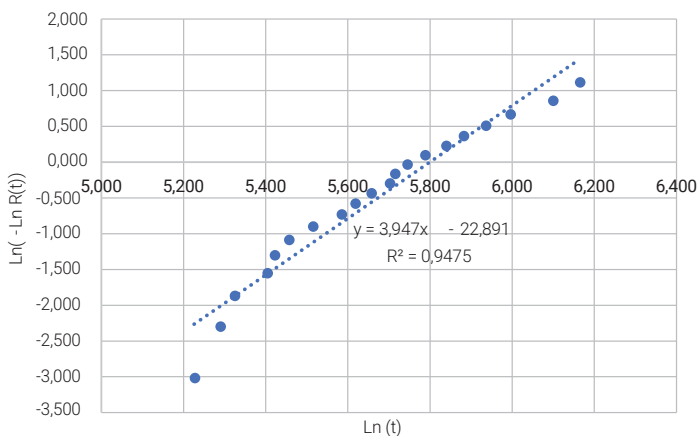
Al construir el gráfico de  $x$  como  $\ln(t)$  en su relación con  $y$  como  $\ln(-\ln R(t))$ , se obtuvo la Figura 1, para la cual la ecuación de regresión es  $y = 3,947x - 22,891$ , siendo la pendiente  $m = 3,947$ , la ordenada al origen  $b = -22,891$  y el coeficiente de determinación  $R^2$  igual a 0,9475, lo que indica un muy buen ajuste lineal. La significancia estadística de  $m$  y de  $b$  fue de 0,000, lo que evidencia que ambos parámetros son significativos. Los residuos mostraron correlación positiva, dada por el coeficiente Durbin-Watson de 0,37.

De la ecuación, se obtiene el valor estimado de  $\beta$ , que corresponde a  $m = 3,947$ , así como la intersección, con la cual, mediante la aplicación de la ecuación (12), se obtiene el parámetro  $\eta$ :

$$\hat{\eta} = e^{\left(\frac{-b}{m}\right)} = e^{\left(\frac{22,891}{3,947}\right)} = 330,17$$

**Figura 1**

*Ecuación de regresión estimada*

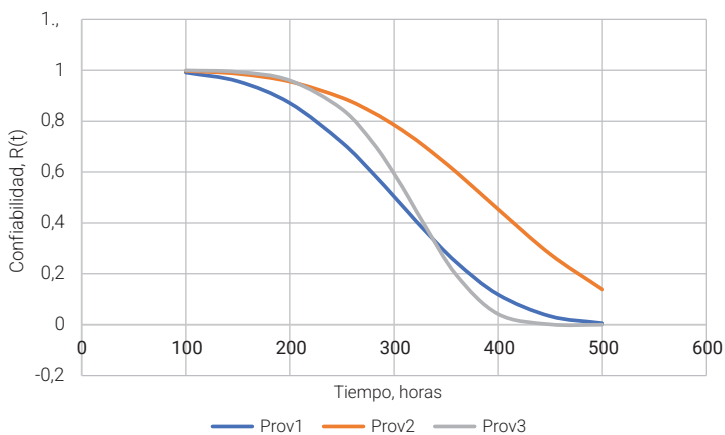


Ya con estos parámetros es posible obtener la curva de confiabilidad y el MTBF del proveedor.

Si se realiza el mismo procedimiento para los tres proveedores, se obtiene el gráfico de las confiabilidades que se muestra en la Figura 2:

**Figura 2**

*Curvas de confiabilidad de los proveedores*



Se observa que el mejor es el segundo proveedor, ya que su curva de confiabilidad es la de los valores más altos.

La Tabla 4 sintetiza los valores del tiempo promedio, la desviación estándar, los parámetros y el MTBF de cada proveedor:

**Tabla 4**

*Resultados de los proveedores*

Proveedor	Estimador $\beta$	Estimador $\eta$	Media de t	Desv. est.	MTBF
1	3,947	330,2	299	79,7	299,0
2	4,112	423,6	385	94,4	384,6
3	6,279	332,8	310	53,8	309,6

El valor máximo de MTBF correspondió también el del segundo proveedor, que además cuenta con la mayor media y la mayor desviación estándar de sus tiempos registrados, pero presenta un valor intermedio de su parámetro  $\beta$ .

Los tres valores estimados de  $\beta$  fueron mayores que uno, lo que indica que las fallas de los componentes de cada proveedor se deben al uso o desgaste de estos.

En cuanto al costo anual que representa el consumo de componentes, este se calcula estimando el número de componentes que se usarán con cada proveedor y, junto con su precio unitario, se obtiene el monto anual, el cual se ilustra para el caso del primer proveedor:

$$\text{Componentes} = \frac{6700 \text{ horas}}{\frac{299,3 \text{ horas}}{\text{comp.}}} = 22,4 \text{ comp.}$$

Esto representa un costo anual en compra de componentes de  $(22,4)(1350 \text{ \$/c}) = 30\ 240$  pesos mexicanos.

Si se repite el mismo proceso para los otros dos proveedores, se obtienen los resultados que se presentan en la Tabla 5:

**Tabla 5**

*Costo anual de componentes de cada proveedor*

Proveedor	Número anual de componentes	Costo, pesos/año
1	22,4	30 240,0
2	17,4	27 579,0
3	22,0	31 240,0

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 5, se observa que el proveedor 2 presenta el menor costo anual de operación, con un valor de 27 579 pesos mexicanos,

en comparación con los proveedores 1 y 3. Esto indica que, bajo el criterio económico y considerando el comportamiento de fallas analizado previamente, el proveedor 2 representa la alternativa más conveniente, ya que permite reducir el costo anual asociado al reemplazo de componentes.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten identificar con claridad que el proveedor 2 presenta un mejor desempeño al combinar un mayor tiempo medio entre fallas y un menor costo anual de operación. Este resultado es relevante, ya que muestra que el criterio de selección no debe centrarse únicamente en el precio unitario del componente, sino en su desempeño a lo largo del tiempo. En este caso, aunque el proveedor 2 ofrece el precio unitario más alto, su mayor durabilidad reduce la frecuencia de reemplazo, lo que se traduce en un menor consumo anual de componentes y, por tanto, en una disminución del costo total.

Desde el punto de vista de la confiabilidad, los valores del parámetro de forma  $\beta$  mayores que uno en los tres proveedores indican que las fallas se presentan por desgaste derivado del uso. Este comportamiento es consistente con sistemas industriales en operación continua. En este contexto, el mayor MTBF del proveedor 2 indica intervalos más amplios entre fallas, lo que favorece la planeación del mantenimiento preventivo y reduce la probabilidad de paros no programados, en concordancia con los estudios reportados en la literatura sobre la aplicación de modelos de confiabilidad para mejorar la gestión del mantenimiento en sistemas industriales (Gallegos Londoño et al., 2022; Gondres Torné et al., 2013; Okoh et al., 2017; Prasetya et al., 2023).

Los resultados remarcan la importancia de integrar indicadores de confiabilidad en la evaluación de proveedores, puesto que incorporan una visión más completa del desempeño de los componentes en condiciones reales de operación. La aplicación de la metodología Weibull en este trabajo para definir el tiempo medio entre fallas de los componentes, incluyendo su costo anual por consumo, ha permitido la selección del mejor proveedor. Este enfoque coincide con los hallazgos reportados por Thavorn y Sudasna-Na-Ayudthya (2022). En particular, el uso del MTBF como indicador facilita la comparación entre proveedores, al reflejar directamente la durabilidad de los componentes.

Por su parte, Shu et al. (2021, 2022) han utilizado la vida útil como un criterio para la validación de proveedores, lo que va en la misma dirección de esta investigación al aplicar Weibull para el caso de la selección de proveedores.

Asimismo, en concordancia con los hallazgos de Anjos (2008) y de Plaskitt et al. (2024), Weibull permite tomar decisiones adecuadas en cuanto al mantenimiento con la finalidad de incrementar la confiabilidad.

La aplicación de Weibull al caso presente permite evaluar los riesgos de cada proveedor, tal como lo han afirmado varios académicos en investigaciones previas (Wu et al., 2007; Singh & Liao, 2025).

En consonancia con Qin et al. (2023), predecir la vida útil o el tiempo entre fallas permite tomar mejores decisiones para el mantenimiento de los equipos.

Adicionalmente, este estudio refuerza la idea de que la selección de proveedores debe considerar el costo total de operación en lugar del costo inicial de adquisición. Este enfoque permite identificar alternativas que, aunque aparentemente son más costosas, generan beneficios económicos en el mediano y largo plazo debido a su mayor confiabilidad.

Finalmente, la aplicación de la distribución de Weibull en este estudio demuestra su utilidad como herramienta práctica para el análisis de datos de fallas y la toma de decisiones en entornos industriales, como se evidencia en la selección del mejor proveedor realizada en este trabajo.

## CONCLUSIONES

En la selección de proveedores, el mejor resultado correspondió al segundo, ya que presenta el valor máximo de tiempo entre fallas, con 384,6 horas, superior en un 28,5 % respecto al primer proveedor y en un 24,2 % respecto al tercer proveedor.

En cuanto al costo anual por la compra de componentes, el segundo proveedor ha sido el más económico, aun cuando su precio unitario es mayor que el de los otros dos proveedores. Debido al menor uso de componentes, representa un ahorro de entre el 10 % y 13 % respecto a los proveedores 1 y 3, respectivamente.

Además, al presentar una mayor confiabilidad, esto también implicaría ahorros en cuestiones de mantenimiento, ya que los componentes del segundo proveedor duran más tiempo entre fallas, lo que permitirá una mejor planeación del mantenimiento preventivo de la empresa.

Por lo tanto, al ser el segundo proveedor el mejor en términos de duración de sus componentes, confiabilidad y costo anual por conceptos relacionados con la adquisición de componentes y el mantenimiento, debe ser el elegido.

La decisión podría haber generado alguna controversia si los proveedores hubiesen sido los mejores en factores diferentes; sin embargo, al coincidir ambos criterios de medición en señalar al segundo como el mejor proveedor, la toma de decisiones se facilita sin necesidad de recurrir a modelos de decisión multicriterio.

Esto demuestra que la distribución de Weibull es de gran utilidad para analizar la vida útil de los componentes, lo que permite hacer una mejor planeación de las actividades de mantenimiento, las cuales son muy importantes actualmente.

Entre las limitaciones de este estudio, pueden señalarse las tres siguientes: (1) al haber realizado un muestreo no probabilístico, no existe la posibilidad de generalizar los resultados; (2) solo se han considerado dos factores para la elección del mejor proveedor, por lo cual sería deseable que un estudio futuro incorporara un mayor número de criterios de decisión, con la finalidad de llegar a la mejor decisión, aun cuando esto implicaría tener que recurrir a modelos multicriterio de decisión; y (3) este trabajo presenta la aplicación de la metodología de Weibull de dos parámetros al caso de elegir al mejor proveedor y no aporta nuevos conocimientos sobre el tema, pero sí permite tomar una decisión más adecuada, lo que representa un beneficio económico para la organización.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

**Juan Manuel Izar Landeta:** conceptualización, *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, *software*, supervisión, visualización, escritura: borrador original, redacción: revisión y edición. **Ivanna López Reyna:** conceptualización, *data curation*, investigación, administración del proyecto, recursos, *software*, validación, visualización, escritura: borrador original, redacción: revisión y edición.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE IA GENERATIVA

Los autores declaran que no se ha utilizado IA.

## REFERENCIAS

- Abuzaid, A. N., Alateeq, M. M., Madadha, S.-a. M., Al Sharari, F. E. A., & Alsbou, M. K. (2024). The effect of suppliers' green and traditional selection criteria in supply chain management on purchasing firms' performance. *Sustainability*, *16*(15), 6276. <https://doi.org/10.3390/su16156276>
- Al-Moisheer, A. S., Sultan, K. S., & Radwan, H. M. M. (2025). A novel adaptable Weibull distribution and its applications. *Axioms*, *14*(7), 490. <https://doi.org/10.3390/axioms14070490>
- Alshanbari, H. M., Ahmad, Z., El-Bagoury, A. A.-A. H., Odhah, O. H., & Rao, G. S. (2024). A new modification of the Weibull distribution: Model, theory, and analyzing engineering data sets. *Symmetry*, *16*(5), 611. <https://doi.org/10.3390/sym16050611>

- Anjos, J. S. (2008, 7-9 de octubre). *How to use Weibull as tool for a decision making on field issues* [Presentación de escrito]. 2008 SAE Brasil Congress and Exhibit, Sao Paulo, Brasil. <https://doi.org/10.4271/2008-36-0192>
- Cooper, M. (2024, 9 de julio). *Understanding supplier selection criteria: Perspectives from procurement professionals in diverse industries*. Preprints.org, <https://doi.org/10.20944/preprints202407.0744.v1>
- Dickson, G. W. (1966). An analysis of vendor selection systems and decisions. *Journal of Purchasing*, 2(1), 5-17. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.1966.tb00818.x>
- Ferrisi, S., Cappellari, P., Guido, R., Umbrello, D., & Ambrogio, G. (2025). Application of two-parameter Weibull distribution for predictive maintenance: A case study. *Procedia Computer Science*, 253, 3160-3168. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.041>
- Gallegos Londoño, C. M., García Mora, F. A., & Caicedo Benavides, F. U. (2022). Applications of the Weibull distribution in the study of reliability. *Conciencia Digital*, 5(3), 48-67. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i3.2203>
- Gondres Torné, I., Báez Prieto, R., Lajes Choy, S., & del Castillo Serpa, A. (2013). Determinación de la confiabilidad en interruptores de potencia: caso de estudio. *Ingeniare*, 21(2), 271-278. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052013000200010>
- Jardine, A. K. S., & Tsang, A. H. C. (2021). *Maintenance, Replacement, and Reliability. Theory and Applications* (3.ª ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429021565>
- Okoh, C., Roy, R., & Mehnen, J. (2017). Predictive maintenance modelling for through-life engineering services. *Procedia CIRP*, 59, 196-201. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.09.033>
- Onukwulu, E. C., Odochi-Agho, M., & Eyo-Udo, N. L. (2024). Innovations in supplier evaluation: Frameworks and techniques for supply chain resilience. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, 11(12), 610-623. <https://doi.org/10.51244/IJRSI.2024.11120056>
- Plaskitt, R., Wynn-Jones, C., & Halfpenny, A. (2024). Weibull or lognormal distribution to characterize fatigue life scatter – which is more suitable? – continued. *Fatigue of Aircraft Structures*, 2024(16), 131-146. <https://doi.org/10.2478/fas-2024-0011>
- Prasetya, M. A., Adhim, F. I., & Al Kindhi, B. (2023). Implementation of Weibull analysis method in designing predictive maintenance for medical mask machine. En *2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation* (pp. 519-527). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA60881.2023.10427705>

- Qin, S., Wang, B. X., Tsai, T.-R., & Wang, X. (2023). The prediction of remaining useful lifetime for Weibull  $k$ -out-of- $n$  load-sharing system. *Reliability Engineering & System Safety*, 233, 109091. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109091>
- Safari, M. A. M., Masseran, N., Majid, M. H. A., & Tajuddin, R. R. M. (2025). Robust estimation of the three parameter Weibull distribution for addressing outliers in reliability analysis. *Scientific Reports*, 15, 11516. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96043-1>
- Shu, M.-H., Wu, C.-W., Hsu, B.-M., & Wang, T.-C. (2021). Lifetime performance-qualified sampling system under a Weibull distribution with failure-censoring. *Quality Engineering*, 33(3), 404-416. <https://doi.org/10.1080/08982112.2021.1874014>
- Shu, M.-H., Wu, C.-W., Hsu, B.-M., & Wang, T.-C. (2022). Standardized lifetime-capability and warranty-return-rate-based suppliers qualification and selection with accelerated Weibull-life type II testing data. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 51(23), 8186-8204. <https://doi.org/10.1080/03610926.2021.1890124>
- Singh, P., & Liao, T. W. (2025). Multi-criteria group decision-making using ambiguous sets, Weibull distribution, and aggregation operators: A case study in optimal vendor selection for office supplies. *Systems and Soft Computing*, 7, 200283. <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2025.200283>
- Sulewski, P., & Drapella, A. (2025). Weibull distribution with linear shape function. *Applied Sciences*, 15(20), 11222. <https://doi.org/10.3390/app152011222>
- Thavorn, E., & Sudasna-Na-Ayudhya, P. (2022). The effects of Weibull distribution on supplier comparison using lower process capability index: A Case Study. *Trends in Sciences*, 19(3), 2158. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.2158>
- Wang, J., Geng, H., & Li, P. (2025). A software reliability model for open source big data systems based on Weibull-Weibull distribution. *Scientific Reports*, 15, 14670. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98942-9>
- Wei, Z., Gupta, R. C., Ng, C. M., & Ong, S. H. (2025). A Weibull COMP-Bessel distribution to analyse life testing data. *Journal of Statistical Theory and Practice*, 19, Artículo 95. <https://doi.org/10.1007/s42519-025-00508-5>
- Wu, T., Blackhurst, J., & O'Grady, P. (2007). Methodology for supply chain disruption analysis. *International Journal of Production Research*, 45(7), 1665-1682. <https://doi.org/10.1080/00207540500362138>
- Yu, W. (2024). Application of Weibull analysis in the optimization of civil aviation aircraft engineering reliability management. *Academic Journal of Engineering and Technology Science*, 7(1), 68-73. <https://doi.org/10.25236/ajets.2024.070111>

**INGENIERÍA  
DE NEGOCIOS**  

---

**Business Engineering**



# DISEÑO DE UN MODELO DE GESTIÓN ESTRATÉGICA BASADO EN *BALANCED SCORECARD* PARA LA MEJORA DEL DESEMPEÑO INSTITUCIONAL EN UNA INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN BÁSICA PRIVADA EN COLOMBIA

DAVID ENRIQUE URIBE SUAREZ

<https://orcid.org/0000-0003-4618-8929>

Facultad Ingeniería Industrial, Universidad Antonio Nariño, Colombia

YERIS BAQUERO BOLAÑOS

<https://orcid.org/0009-0009-1231-4027>

Facultad Ingeniería Industrial, Universidad Antonio Nariño, Colombia

JOSÉ RICARDO FUENTES JARAMILLO

<https://orcid.org/0009-0002-1622-2815>

Facultad Ingeniería Industrial, Universidad Antonio Nariño, Colombia

Recibido: 4 de febrero del 2026 / Aceptado: 9 de marzo del 2026

Publicado: 15 de junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8573>

**RESUMEN.** Este estudio tuvo como objetivo diseñar un modelo institucional basado en el *balanced scorecard* (BSC) que articule la planificación, el seguimiento y la evaluación del desempeño en una institución educativa privada del Caribe colombiano. La investigación aborda la problemática de la ausencia de un sistema formal de gestión estratégica en dicho contexto organizacional. Se adoptó un enfoque cualitativo exploratorio-descriptivo mediante un estudio de caso único con análisis documental, entrevistas semiestructuradas y observación

---

La investigación es financiada por la Universidad Antonio Nariño mediante el proyecto de investigación 2024230.

\* Autor corresponsal

Correos electrónicos en orden de aparición: daviduribe246@uan.edu.co; ybaquero61@uan.edu.co; jfuentes90@uan.edu.co

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

no participante de treinta actores institucionales. Asimismo, se incorporó un análisis semi-cuantitativo basado en la frecuencia de menciones por perspectiva del BSC. Los resultados evidenciaron vacíos estructurales en las cuatro dimensiones: procesos internos (93,33 %), clientes (86,67 %), aprendizaje y crecimiento (83,33 %), y financiera (80,00 %), con una media de 25,75 menciones y una desviación estándar de 1,71. La prueba  $\chi^2(3) = 0,34$  ( $p = 0,952$ ) indicó ausencia de diferencias significativas. Con todo ello, se propuso un modelo compuesto por quince objetivos estratégicos con indicadores e iniciativas de implementación, el cual articuló la planificación, el seguimiento y la evaluación del desempeño institucional, lo que fortaleció la toma de decisiones y la mejora continua organizacional.

PALABRAS CLAVE: *balanced scorecard* / gestión estratégica educativa / desempeño organizacional / educación básica privada / control de gestión

## DESIGN OF A STRATEGIC MANAGEMENT MODEL BASED ON THE BALANCED SCORECARD TO IMPROVE INSTITUTIONAL PERFORMANCE IN A PRIVATE BASIC EDUCATION INSTITUTION IN COLOMBIA

ABSTRACT. This study aimed to design an institutional management model based on the Balanced Scorecard (BSC) to integrate planning, monitoring, and performance evaluation in a private educational institution in the Colombian Caribbean region. The research addresses the problems associated with the absence of a formal strategic management system in this organizational context. A qualitative exploratory-descriptive approach was adopted through a single case study design, using document analysis, semi-structured interviews, and non-participant observation involving 30 institutional stakeholders. A complementary semi-quantitative analysis based on the frequency of mentions by BSC perspective was incorporated. The results revealed structural gaps across the four dimensions: internal processes (93,33%), customers (86,67%), learning and growth (83,33%), and financial (80,00%), with a mean of 25,75 mentions and a standard deviation of 1,71. The chi-square test  $\chi^2(3) = 0,34$  ( $p = 0,952$ ) indicated no statistically significant differences. As a result, a strategic institutional model was designed, consisting of fifteen strategic objectives supported by indicators and implementation initiatives, which enables the integration of planning, monitoring, and institutional performance evaluation, strengthening decision-making and continuous organizational improvement.

KEYWORDS: Balanced Scorecard / strategic management in schools / organizational performance / educational service organizations / performance measurement

## INTRODUCCIÓN

Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, las instituciones educativas pueden entenderse como organizaciones de servicios que requieren sistemas formales de gestión para alinear sus procesos, recursos y resultados con objetivos estratégicos definidos. En el contexto actual, estas instituciones enfrentan crecientes exigencias relacionadas con la eficiencia operativa, la calidad del servicio educativo y la sostenibilidad organizacional. Estos retos han impulsado la adopción de enfoques de gestión estratégica orientados a articular la planificación, la ejecución y la evaluación del desempeño institucional.

En el caso colombiano, el sector de educación básica privada opera en un entorno competitivo caracterizado por restricciones presupuestales, dependencia de las matrículas como fuente principal de ingresos, y crecientes demandas de calidad académica y transparencia administrativa. Sin embargo, desde la perspectiva de la gestión estratégica en organizaciones educativas, la literatura ha mostrado un mayor desarrollo de sistemas formales de acreditación, indicadores de desempeño y modelos consolidados de control estratégico en instituciones de educación superior (Camilleri, 2021; Fumasoli & Hladchenko, 2023; Lassoued, 2018). En contraste, la implementación de herramientas estructuradas de medición estratégica en niveles básicos ha sido más limitada y fragmentaria (Pereira & Melão, 2012). Esta situación ha generado brechas técnicas relacionadas con la ausencia de indicadores sistemáticos, la informalidad en la planificación y la débil articulación entre la estrategia y la operación.

En este marco, el *balanced scorecard* (BSC) ('cuadro de mando integral', en español), propuesto por Kaplan y Norton (2002), se ha consolidado como un sistema integral de gestión estratégica que permite traducir la estrategia organizacional en objetivos, indicadores y acciones distribuidos en cuatro perspectivas interrelacionadas: financiera, de clientes, de procesos internos, y de aprendizaje y crecimiento. Más allá de un simple instrumento de medición, el BSC funciona como un sistema de control de gestión que articula la planificación estratégica con la ejecución operativa, lo que facilita la alineación organizacional y la toma de decisiones basada en indicadores estructurados.

Diversos estudios empíricos han demostrado la eficacia del BSC en distintos contextos organizacionales. En el ámbito empresarial, Benková et al. (2020) analizan los factores que influyen en su adopción en organizaciones privadas, mientras que Ta et al. (2022) examinan su impacto en la eficiencia operativa de compañías listadas en bolsa. Desde una perspectiva de sostenibilidad organizacional, Rafiq et al. (2020) evidencian su contribución a la mejora del desempeño sostenible mediante modelos de mediación estructural. En el ámbito de los sistemas de control y gestión por procesos, Lee et al. (2021) destacan su utilidad para fortalecer la eficiencia organizacional, mientras que Kumar et al. (2023) muestran su aplicación en una entidad del sector público como herramienta para mejorar el desempeño institucional. Estos antecedentes confirman la versatilidad del BSC como instrumento de control estratégico en organizaciones empresariales y públicas.

Asimismo, la literatura evidencia un uso extendido del BSC en el ámbito de la educación superior, donde se ha consolidado como herramienta para estructurar la planificación estratégica, evaluar el desempeño institucional y fortalecer la gobernanza académica (Camilleri, 2021; Lassoued, 2018; Quesado et al., 2013). Aunque estos estudios se desarrollan en universidades, constituyen un referente técnico relevante para instituciones escolares al ofrecer marcos metodológicos, indicadores y mecanismos de alineación estratégica que pueden adaptarse como *benchmark* de gestión en niveles educativos distintos. Investigaciones recientes refuerzan esta perspectiva al destacar la capacidad del BSC para integrar indicadores financieros y no financieros en organizaciones educativas complejas (Coskun & Nizaeva, 2023; Mendes & Alves, 2023).

No obstante, en el ámbito escolar, la aplicación del BSC continúa siendo limitada y fragmentaria. Algunos estudios han explorado su uso en contextos específicos, como el modelo participativo implementado por Pereira y Melão (2012) en una escuela pública o el sistema de medición del desempeño propuesto por Saksono y Bernardus (2023) en una institución privada. Aunque estos trabajos destacan el potencial del BSC como herramienta para la gestión escolar, también señalan que las instituciones educativas enfrentan dificultades asociadas a la informalidad de los procesos, la ausencia de indicadores sistemáticos y la escasa articulación entre la estrategia y la operación.

Desde una perspectiva organizacional, investigaciones como la de Falqueto et al. (2020) subrayan la relevancia de la participación de los actores institucionales en los procesos de planificación estratégica, especialmente en organizaciones intensivas en servicios, donde la interacción entre directivos, docentes y usuarios resulta determinante. Igualmente, estudios recientes han propuesto enfoques metodológicos avanzados para fortalecer el diseño de mapas estratégicos del BSC que incorporan técnicas como *fuzzy decision making trial and evaluation laboratory* (DEMATEL) ('DEMATEL con lógica difusa', en español) y modelos de optimización para identificar relaciones causales entre objetivos estratégicos (López-Ospina et al., 2022).

A pesar de los avances reportados en la literatura, el diagnóstico preliminar realizado en la institución objeto de estudio permitió identificar brechas técnicas frente a prácticas de gestión estratégica consolidadas en el sector educativo. En particular, se observó la ausencia de un mapa estratégico formal, la inexistencia de indicadores financieros proyectados a mediano plazo, la falta de métricas sistemáticas de satisfacción de estudiantes y padres de familia, así como la carencia de mecanismos estructurados para el seguimiento de procesos académicos y administrativos. Estas condiciones contrastan con estándares de gestión adoptados en organizaciones educativas más consolidadas, en las que suelen emplearse sistemas formales de control de gestión y medición del desempeño institucional. En consecuencia, la brecha identificada se manifiesta no solo a nivel conceptual, sino también operativo, lo que justifica el diseño de un modelo de gestión basado en el BSC.

En términos operativos, la brecha técnica puede observarse mediante indicadores básicos de desempeño institucional. Por ejemplo, la matrícula pasó de 65 estudiantes en 2024 a 68 en 2025, lo que representa un crecimiento limitado del 4,62 %, sin que existan metas estratégicas formales que orienten dicha evolución. Desde la perspectiva financiera, se evidenció que el 100 % de los ingresos institucionales proviene de matrículas y pensiones sin diversificación de fuentes ni proyecciones financieras a mediano plazo. Situaciones de este tipo reflejan limitaciones en la gestión estratégica institucional. En este sentido, Rompho (2020) señala que en muchas instituciones educativas la evaluación del desempeño tiende a centrarse principalmente en los resultados académicos, mientras que se carece de sistemas integrales de gestión estratégica y de indicadores que permitan articular de manera coherente la estrategia institucional, los procesos organizacionales y los resultados educativos.

En consecuencia, la ausencia de herramientas de gestión estratégica dificulta el seguimiento sistemático del desempeño institucional y limita la capacidad de las organizaciones educativas para orientar sus decisiones hacia objetivos de largo plazo. En este contexto, Rompho (2020), a partir del análisis de más de tres mil escuelas públicas en Tailandia, evidenció que la implementación del BSC puede contribuir a establecer relaciones estratégicas entre el aprendizaje organizacional, los procesos internos y el desempeño de los estudiantes, lo cual fortalece los sistemas de monitoreo institucional y la toma de decisiones estratégicas.

En este contexto, el BSC no solo se asume como un marco conceptual, sino como una herramienta metodológica para el análisis y el diseño del modelo de gestión estratégica. Su aplicación en este estudio permite estructurar el diagnóstico institucional, identificar brechas técnicas en cada una de sus perspectivas y formular objetivos estratégicos, indicadores y líneas de acción orientadas a la mejora del desempeño organizacional.

De esta manera, en respuesta a la problemática que se ha detallado con anterioridad, el presente estudio tiene como objetivo diseñar un modelo de gestión estratégica institucional basado en el BSC para una institución de educación básica privada en Colombia. A partir de este propósito, la investigación se orienta a responder la siguiente pregunta problema: ¿cómo puede estructurarse un modelo de gestión estratégica, basado en el BSC, que permita articular la planificación, el seguimiento y la evaluación del desempeño institucional en una organización educativa escolar?

Así, este estudio se posiciona como un aporte aplicado al campo de la gestión de organizaciones de servicios al adaptar un sistema de control estratégico, ampliamente validado en contextos empresariales, a la realidad operativa y organizacional de una institución educativa. En este sentido, el modelo propuesto busca contribuir al fortalecimiento de la gestión institucional mediante un enfoque sistemático, integrador y orientado a la mejora del desempeño.

## METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo exploratorio-descriptivo y empleó un diseño de estudio de caso único, apropiado para análisis profundos de fenómenos organizacionales en contextos específicos (Creswell & Poth, 2016; Yin, 2018). La unidad de análisis fue una institución educativa escolar privada del Caribe colombiano, seleccionada mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional con base en criterios de accesibilidad, nivel de formalización organizacional y disposición institucional para participar en procesos de mejora estratégica. Este tipo de muestreo resulta pertinente en estudios de caso cualitativos, en los que la selección se orienta a la profundidad analítica más que a la representatividad estadística.

La recolección de información se realizó mediante la triangulación de tres técnicas cualitativas: análisis documental, entrevistas semiestructuradas y observación no participante. El análisis documental incluyó la revisión sistemática de instrumentos institucionales vigentes (proyecto educativo institucional [PEI], manuales de procesos, planes operativos y documentos administrativos) seleccionados por su alta relevancia para la planificación estratégica y la gestión institucional.

Las entrevistas semiestructuradas se aplicaron a treinta actores institucionales seleccionados mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, considerando criterios de responsabilidad directiva, participación en procesos administrativos o académicos clave y experiencia mínima de un año en la institución. Este procedimiento permitió recoger información estratégica desde distintos niveles de la estructura organizacional.

La observación no participante se realizó en procesos académicos y administrativos críticos previamente identificados (reuniones de coordinación, seguimiento a planes operativos y actividades de gestión académica) con el propósito de contrastar la información declarada con las prácticas organizacionales reales. La triangulación de estas tres fuentes permitió capturar múltiples perspectivas del fenómeno estudiado y fortalecer la credibilidad y validez interna del análisis (Denzin, 2017).

El análisis de la información se llevó a cabo mediante codificación temática con enfoque deductivo-inductivo, estructurada en torno a las cuatro perspectivas del *balanced scorecard*. Inicialmente, se establecieron categorías deductivas asociadas a cada perspectiva; posteriormente, emergieron subcategorías a partir del análisis sistemático de los datos recolectados siguiendo los lineamientos de la codificación temática propuestos por Braun y Clarke (2006), y desarrollados metodológicamente por Saldaña (2016).

Para asegurar la rigurosidad analítica, se implementó un proceso de codificación doble, en el cual dos investigadores realizaron la codificación de manera independiente. Las discrepancias fueron discutidas hasta alcanzar consenso. Asimismo, se desarrolló

una validación cruzada con actores institucionales clave, un procedimiento alineado con los criterios de credibilidad y confirmabilidad planteados por Lincoln y Guba (1985).

Con el propósito de reforzar la interpretación de los resultados cualitativos y aportar un nivel adicional de sistematicidad al análisis, se incorporó un análisis semicuantitativo de carácter complementario sin pretensiones inferenciales. Las unidades de significado identificadas durante la codificación temática fueron cuantificadas mediante el conteo de ocurrencias asociadas a cada perspectiva del BSC. Cada mención relevante en entrevistas, documentos u observaciones fue registrada y clasificada según la categoría correspondiente, lo que permitió estimar frecuencias absolutas y relativas de recurrencia temática.

La cuantificación de estas recurrencias no buscó establecer relaciones causales generalizables, sino identificar patrones de énfasis estratégico dentro del discurso institucional. En este sentido, se calcularon medidas descriptivas, como la media y la desviación estándar, con el fin de evaluar la dispersión de las menciones entre perspectivas. De manera complementaria, se aplicó la prueba de chi-cuadrado de bondad de ajuste como recurso exploratorio para analizar la homogeneidad en la distribución de frecuencias y valorar si alguna perspectiva presentaba una predominancia significativa en el conjunto de datos. Este procedimiento metodológico responde a enfoques mixtos de integración cualitativa-cuantitativa orientados a fortalecer la robustez analítica sin alterar la naturaleza interpretativa del estudio (Miles et al., 2014). La incorporación del análisis semicuantitativo permitió respaldar el diseño equilibrado del modelo estratégico propuesto, lo que evitó la sobrevaloración subjetiva de una sola perspectiva del BSC.

La calidad metodológica del estudio se aseguró mediante la convergencia de múltiples fuentes de información, la validación cruzada con actores institucionales y la documentación detallada del contexto, los criterios de selección y el proceso analítico. Todo ello favorece la credibilidad y la transferibilidad de los resultados a instituciones educativas con características organizacionales similares (Lincoln & Guba, 1985).

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir del análisis documental, las entrevistas semiestructuradas y la observación de procesos permitieron identificar los elementos críticos que fundamentan el diseño del modelo estratégico institucional basado en el *balanced scorecard*. Los hallazgos se organizaron según las cuatro perspectivas del BSC y emergieron de un proceso sistemático de codificación aplicado a las respuestas de los actores institucionales, a los documentos estratégicos (PEI, manuales de procesos y lineamientos administrativos) y a las observaciones realizadas durante los procesos académicos y administrativos. La Tabla 1 presenta las categorías y las subcategorías emergentes identificadas en cada perspectiva, las cuales reflejan patrones recurrentes de gestión y áreas críticas de mejora institucional.

**Tabla 1**

*Categorías y subcategorías emergentes de BSC*

Categoría (perspectiva BSC)	Subcategorías o códigos emergentes
1. Perspectiva financiera	1.1 Ausencia de metas presupuestales 1.2 Control contable sin evaluación estratégica 1.3 Falta de proyecciones financieras 1.4 Dependencia de matrícula como único ingreso
2. Perspectiva clientes (estudiantes y familias)	2.1 Cercanía con las familias 2.2 Comunicación informal efectiva 2.3 Ausencia de encuestas de satisfacción 2.4 Debilidad en mecanismos de retroalimentación
3. Perspectiva procesos internos	3.1 Procesos sin estandarización 3.2 Manuales poco usados 3.3 Falta de seguimiento a planes operativos 3.4 Inexistencia de indicadores de gestión
4. Perspectiva aprendizaje y crecimiento	4.1 Ausencia de formación docente sistemática 4.2 Escasa innovación pedagógica 4.3 Falta de evaluación del clima laboral 4.4 Necesidad de liderazgo distribuido

Las subcategorías fueron asignadas a cada perspectiva del BSC con base en su correspondencia conceptual con los objetivos estratégicos definidos en el marco teórico. En los casos en que un código emergente pudiera vincularse con más de una perspectiva, se priorizó aquella donde su impacto estratégico resultaba más directo siguiendo criterios de coherencia analítica y consenso entre investigadores durante el proceso de codificación doble.

**Perspectiva financiera**

El análisis evidenció una utilización predominantemente operativa de la información financiera, desvinculada de procesos formales de planificación estratégica. Aunque la institución cuenta con registros contables básicos, estos no se emplean para definir metas presupuestales ni para realizar proyecciones financieras de mediano o largo plazo. Asimismo, la mayoría de los entrevistados reconoció la inexistencia de análisis financieros con enfoque estratégico, así como una alta dependencia de la matrícula estudiantil como única fuente de ingresos. Todo ello limita la sostenibilidad institucional y la capacidad de toma de decisiones informadas.

**Perspectiva de clientes (estudiantes y familias)**

Los resultados muestran una relación cercana entre la institución y las familias; sin embargo, esta se sustenta, principalmente, en mecanismos de comunicación directa e informal. Igualmente, se identificó la ausencia de instrumentos sistemáticos para evaluar

la satisfacción, gestionar la retroalimentación y analizar la lealtad de los usuarios. Esta carencia restringe la capacidad institucional para transformar la percepción de los clientes en información estratégica útil para la mejora continua del servicio educativo.

### Perspectiva de procesos internos

En esta dimensión, se identificaron debilidades estructurales relacionadas con la estandarización, seguimiento y evaluación de los procesos clave. Aunque existen manuales y descripciones de funciones, estos no son utilizados de manera sistemática como herramientas de gestión. Asimismo, no se evidenció la implementación de indicadores formales que permitan evaluar el desempeño de los procesos académicos y administrativos, lo que genera una desconexión entre la planificación institucional y la ejecución operativa.

### Perspectiva de aprendizaje y crecimiento

Esta perspectiva presentó los mayores vacíos en términos de gestión estratégica. No se identificaron planes institucionales estructurados de formación docente ni mecanismos periódicos de evaluación del clima organizacional. La capacitación y la innovación pedagógica dependen, en gran medida, de iniciativas individuales, lo que limita el desarrollo del capital humano y la consolidación de una cultura organizacional orientada al aprendizaje y a la mejora continua. Estos hallazgos evidencian la necesidad de un sistema de gestión estratégica que articule objetivos, indicadores y mecanismos de seguimiento desde una visión integral, coherente con los principios del BSC.

A partir del diagnóstico realizado, se identificaron quince objetivos estratégicos preliminares agrupados en las cuatro perspectivas del BSC (ver Tabla 2), los cuales sirvieron como base para la construcción del modelo estratégico institucional y su correspondiente mapa estratégico.

**Tabla 2**

*Objetivos estratégicos derivados del diagnóstico institucional organizados por perspectiva BSC*

Perspectiva BSC	Objetivo estratégico
Financiera	FO1. Alcanzar un nivel $\geq 90$ % de cumplimiento de metas presupuestales anuales alineadas al plan institucional
	FO2. Implementar proyecciones financieras anuales que cubran el 100 % de ingresos y egresos institucionales
	FO3. Lograr que al menos el 10 % de los ingresos institucionales provengan de fuentes distintas a la matrícula estudiantil en un plazo de 3 años

(continúa)

(continuación)

Perspectiva BSC	Objetivo estratégico
Clientes (estudiantes y familias)	CO1. Alcanzar un nivel de satisfacción $\geq 85\%$ en estudiantes y familias
	CO2. Incrementar a $\geq 3$ los canales formales de comunicación institucional activos
	CO3. Implementar un sistema de retroalimentación con al menos $90\%$ de solicitudes atendidas en tiempos definidos
	CO4. Alcanzar una tasa de retención estudiantil $\geq 90\%$ anual como indicador de fidelización
Procesos internos	PIO1. Estandarizar $100\%$ de los procesos académicos y administrativos
	PIO2. Implementar indicadores de gestión en al menos el $100\%$ de los procesos críticos institucionales
	PIO3. Lograr un nivel $\geq 85\%$ de cumplimiento de las acciones definidas en el plan operativo anual (POA)
	PIO4. Garantizar la realización de $\geq 2$ ciclos anuales de evaluación institucional
Aprendizaje y crecimiento	ACO1. Alcanzar un mínimo de 40 horas anuales de formación docente por cada profesor
	ACO2. Lograr que el $70\%$ del currículo integren TIC en sus prácticas pedagógicas
	ACO3. Alcanzar un nivel $\geq 80\%$ en el índice de clima laboral institucional
	ACO4. Lograr que $\geq 70\%$ de los equipos docentes participen en iniciativas de liderazgo colaborativo institucional

Con el fin de complementar el análisis cualitativo, se contabilizaron las unidades de significado asociadas a cada perspectiva del BSC a partir de entrevistas, documentos institucionales y observaciones. Este análisis semicuantitativo permitió identificar la recurrencia relativa de las temáticas estratégicas emergentes (ver Tabla 3), en la que la perspectiva de procesos internos fue la más mencionada.

**Tabla 3**

*Frecuencias de subcategorías*

Perspectiva BSC	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia porcentual (%)
Financiera	24,00	0,80	80,00
Clientes (estudiantes y familias)	26,00	0,87	86,67
Procesos internos	28,00	0,93	93,33
Aprendizaje y crecimiento	25,00	0,83	83,33
Media de frecuencias	25,75	-	-
Desviación estándar de frecuencias	1,71	-	-

Se realizó un análisis descriptivo complementario sobre la frecuencia de aparición de las perspectivas del BSC en los datos recolectados. Los resultados muestran que la perspectiva de procesos internos registró el mayor porcentaje de menciones (93,33 %), seguida de clientes (86,67 %), aprendizaje y crecimiento (83,33 %) y financiera (80,00 %). El promedio de frecuencias absolutas fue de 25,75 menciones con una desviación estándar de 1,71, lo que indica una distribución relativamente homogénea entre las cuatro perspectivas.

Desde una perspectiva estratégica, el mayor énfasis en procesos internos (93,33 %) sugiere que la organización concentra su atención en la operatividad y en la resolución de problemas administrativos y académicos cotidianos, lo cual puede reflejar una orientación reactiva hacia la gestión. Esta tendencia es consistente con contextos organizacionales en los que la formalización de procesos constituye una necesidad prioritaria para alcanzar niveles básicos de eficiencia institucional.

Por otro lado, la alta recurrencia de la perspectiva de clientes (86,67 %) indica una preocupación relevante por la relación con estudiantes y familias, especialmente en términos de comunicación y satisfacción. Sin embargo, la menor proporción relativa en la perspectiva financiera podría evidenciar una limitada cultura de planeación presupuestal y proyección estratégica de ingresos, un aspecto crítico en instituciones privadas dependientes de matrículas.

Estos resultados reflejan una estructura estratégica relativamente equilibrada, aunque con un énfasis operativo más marcado que financiero. Esta configuración justificó el diseño de un modelo BSC orientado a fortalecer la integración entre planificación financiera, estandarización de procesos y desarrollo organizacional, a fin de evitar la concentración en una sola perspectiva.

**Tabla 4**

*Prueba de chi-cuadrado*

Perspectiva BSC	Frecuencia observada (O)	Frecuencia esperada (E)	(O - E)	(O - E) <sup>2</sup> / E
Financiera	24	25,75	-1,75	0,1190
Clientes (estudiantes y familias)	26	25,75	0,25	0,0024
Procesos internos	28	25,75	2,25	0,1962
Aprendizaje y crecimiento	25	25,75	-0,75	0,0222
Total	103	103,00	-	0,3400

Nota. Estadístico  $\chi^2(3) = 0,34$ ;  $p = 0,952$ . Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .

Los resultados de la prueba de chi-cuadrado, presentados en la Tabla 4, muestran un valor  $\chi^2(3) = 0,34$  con  $p = 0,952$ . Dado que el valor  $p$  es superior al nivel de significancia

convencional ( $\alpha = 0,05$ ), no se rechaza la hipótesis nula de igualdad de distribución. En consecuencia, no se evidencian diferencias estadísticamente significativas en la frecuencia de menciones entre las cuatro perspectivas del BSC.

Este hallazgo sugiere que, desde la percepción de los actores institucionales, las dimensiones financieras, clientes, procesos internos y aprendizaje y crecimiento presentan una relevancia estratégica comparable. Desde una perspectiva de diseño organizacional, este resultado respalda la necesidad de un modelo equilibrado que evite la priorización aislada de una sola perspectiva y promueva una gestión sistémica e integrada.

### **Modelo estratégico institucional basado en el *balanced scorecard***

Como resultado de la triangulación metodológica y del análisis integrado de los hallazgos, se diseñó un modelo estratégico institucional basado en el BSC adaptado al contexto de una institución educativa escolar concebida como organización de servicios. El modelo articula los quince objetivos estratégicos identificados en las cuatro perspectivas del BSC y establece relaciones causales que permiten vincular el desarrollo del capital humano, la mejora de los procesos internos, la satisfacción de los usuarios y la sostenibilidad financiera.

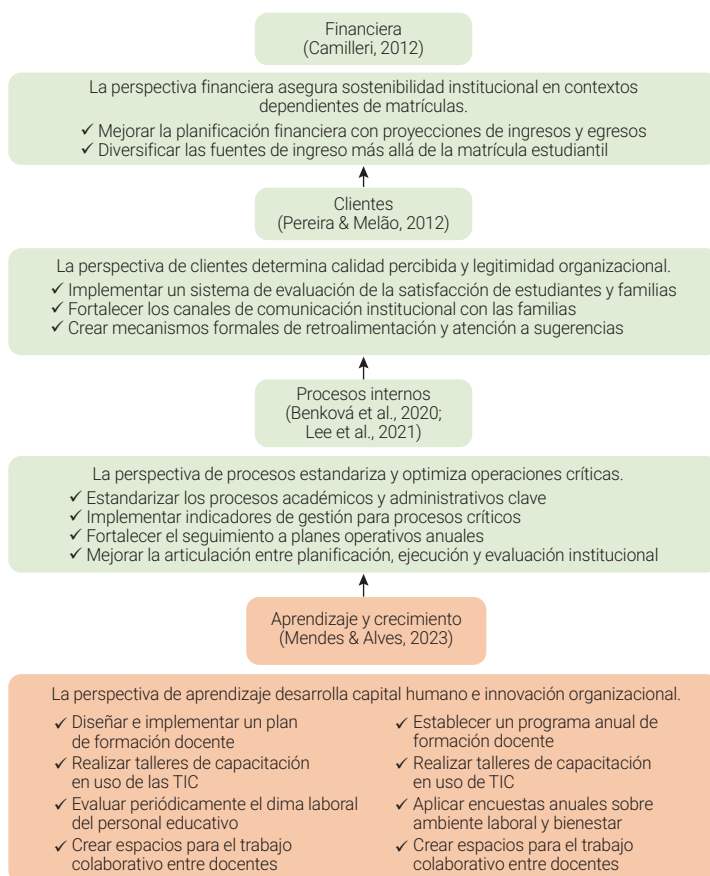
Este modelo constituye un insumo estratégico para la toma de decisiones directivas, la evaluación del desempeño institucional y la alineación entre la planificación, la ejecución y el control. Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, el modelo aporta una estructura formal de gestión estratégica transferible a otras instituciones educativas con características organizacionales similares. En la Figura 1, se identifica el mapa estratégico del modelo de gestión.

La propuesta del modelo estratégico no solo agrupa los objetivos por perspectiva, sino que también sugiere una lógica clara que va con el enfoque del BSC. Así que, lo que se busca con las acciones para mejorar el desarrollo de los docentes, la innovación en la enseñanza y un liderazgo más compartido afecta directamente en cómo mejoran los procesos académicos y administrativos importantes.

Finalmente, se diseñó un conjunto preliminar de indicadores estratégicos (Tabla 5) que operacionaliza cada objetivo mediante métricas observables, fuentes de verificación y frecuencias de seguimiento. Con ello, se sientan las bases para la implementación, el monitoreo y la mejora continua del modelo estratégico institucional.

**Figura 1**

*Mapa estratégico del modelo de gestión institucional basado en *balanced scorecard**



Los resultados evidencian que la institución analizada presenta debilidades estructurales en las cuatro perspectivas del BSC, lo que confirma la ausencia de un sistema formal e integrado de gestión estratégica. La identificación de quince objetivos estratégicos (ver Tabla 5) y su correspondiente operacionalización mediante indicadores, fuentes de información y frecuencias de seguimiento permitió estructurar un modelo coherente con la lógica del BSC y ajustado al contexto de una organización educativa escolar. Estos hallazgos constituyen la base empírica sobre la cual se sustenta el modelo estratégico propuesto y proporcionan los elementos necesarios para su análisis e interpretación en la sección de discusión.

**Tabla 5***Indicadores propuestos por objetivo estratégico según la perspectiva del BSC*

Perspectiva BSC	Objetivo estratégico	Indicador propuesto	Frecuencia de seguimiento	Fuente de información
Financiera	F01	Porcentaje de cumplimiento de metas presupuestales	Anual	Informe financiero
	F02	Porcentaje de cobertura de proyecciones financieras sobre ingresos y egresos totales	Anual	Presupuesto anual
	F03	Porcentaje de ingresos provenientes de fuentes distintas a matrícula	Anual	Informe de gestión
Clientes	C01	Porcentaje de satisfacción de familias en encuestas anuales	Anual	Encuesta a padres
	C02	Número de canales activos	Semestral	Registros de comunicación institucional
	C03	Porcentaje de solicitudes atendidas dentro del tiempo establecido	Semestral	Buzón físico o digital
	C04	Tasa de retención estudiantil anual (%)	Anual	Base de datos académica
Procesos internos	PI01	Porcentaje de procesos documentados, estandarizados y en uso	Semestral	Manual de procesos
	PI02	Porcentaje de procesos críticos con indicadores definidos y monitoreados	Semestral	Sistema de gestión escolar
	PI03	Porcentaje de cumplimiento del POA	Semestral	Actas de seguimiento POA
	PI04	Porcentaje de cumplimiento del plan de evaluación institucional anual	Semestral	Actas de consejo académico directivo
Aprendizaje y crecimiento	AC01	Porcentaje de currículo por asignatura que integran TIC en el aula	Semestral	Plan de formación docente
	AC02	Porcentaje de docentes que aplican TIC en el aula	Anual	Informe académico
	AC03	Índice de clima laboral (%)	Anual	Encuesta institucional
	AC04	Porcentaje de docentes que participan en iniciativas colaborativas	Semestral	Informe de proyectos o actas de reuniones

Con el fin de operacionalizar los objetivos estratégicos y avanzar hacia un nivel de implementación, se definieron iniciativas estratégicas concretas asociadas a cada objetivo (ver Tabla 6), lo que permite traducir el mapa estratégico en acciones ejecutables.

**Tabla 6***Iniciativas estratégicas propuestas por objetivo según la perspectiva del BSC*

Perspectiva BSC	Objetivo estratégico	Iniciativa estratégica propuesta
Financiera	FO1	Elaboración anual de un presupuesto estratégico participativo vinculado al plan operativo anual (POA) con metas financieras cuantificadas y responsables asignados
	FO2	Diseño e implementación de un modelo básico de proyección financiera a tres años, incluyendo escenarios de matrícula, costos operativos y punto de equilibrio
	FO3	Desarrollo de programas complementarios (cursos extracurriculares, escuela de padres, alianzas institucionales) como líneas alternativas de generación de ingresos.
Clientes (estudiantes y familias)	CO1	Diseño y aplicación semestral de una encuesta digital estructurada de satisfacción con análisis de resultados y plan de mejora asociado
	CO2	Creación de un protocolo formal de comunicación institucional que integre plataforma digital, reuniones periódicas y boletines informativos estandarizados
	CO3	Implementación de un sistema de recepción y seguimiento de quejas y sugerencias (buzón físico y digital) con tiempos definidos de respuesta
	CO4	Diseño de un plan anual de fidelización que incluya seguimiento a permanencia, actividades de integración y análisis de causas de deserción
Procesos internos	PIO1	Actualización, socialización y validación institucional del Manual de Procesos incorporando diagramas de flujo y responsables definidos
	PIO2	Diseño de un tablero de control institucional con indicadores clave (KPI) para procesos académicos, administrativos y financieros
	PIO3	Implementación de reuniones trimestrales de seguimiento al POA con reporte formal de avances, desviaciones y acciones correctivas
	PIO4	Creación de un comité de gestión estratégica encargado de revisar metas, indicadores y resultados de manera semestral
Aprendizaje y crecimiento	ACO1	Elaboración de un plan anual de formación docente basado en diagnóstico de necesidades y metas institucionales
	ACO2	Implementación de un programa piloto de innovación pedagógica con acompañamiento y evaluación de experiencias significativas en aula
	ACO3	Aplicación anual de encuesta de clima organizacional con retroalimentación colectiva y plan de mejora institucional
	ACO4	Creación de equipos de liderazgo pedagógico responsables de proyectos institucionales estratégicos

Con base en los indicadores planteados durante el análisis institucional, se realiza una estimación prospectiva del posible impacto derivado de la potencial implementación del modelo de gestión estratégica basado en BSC. Esta estimación no corresponde a una medición longitudinal del desempeño, sino a una proyección estratégica razonada construida a partir de los valores observados en el diagnóstico institucional, las metas

definidas en el modelo propuesto y la lógica causal del BSC que vincula aprendizaje organizacional, procesos internos y resultados institucionales. En este sentido, las proyecciones representan escenarios estratégicos plausibles derivados del diagnóstico del caso, coherentes con los principios de gestión estratégica descritos en la literatura sobre BSC en instituciones educativas (Rompho, 2020).

En la perspectiva financiera, el diagnóstico evidenció una dependencia total de los ingresos por matrícula y un crecimiento limitado de estudiantes (de 65 a 68 entre 2024 y 2025). Bajo la implementación del modelo estratégico, la incorporación de metas financieras y estrategias de diversificación permitiría proyectar un crecimiento moderado de la matrícula entre 5 % y 6 % anual, así como alcanzar un 10 % de ingresos provenientes de fuentes complementarias en un horizonte de tres años, en coherencia con el indicador FO3 definido en el modelo.

En la perspectiva de clientes, la ausencia de mecanismos formales de evaluación de satisfacción y fidelización sugiere la necesidad de implementar instrumentos sistemáticos de seguimiento. A partir del modelo propuesto, se proyecta alcanzar niveles de satisfacción institucional iguales o superiores al 85 %, medidos mediante encuestas estructuradas en correspondencia con el indicador CO1, así como mejorar la retención estudiantil hacia valores iguales o superiores al 90 % anual (CO4).

En la perspectiva de procesos internos, la inexistencia de indicadores de gestión y la limitada estandarización de procesos evidencian oportunidades de mejora en la articulación entre planificación y seguimiento. La incorporación de indicadores institucionales y el monitoreo sistemático del plan operativo anual (POA) permitirían proyectar niveles de cumplimiento iguales o superiores al 85 % en la ejecución del POA (PIO3), así como avances significativos en la estandarización y control de procesos críticos.

Finalmente, en la perspectiva de aprendizaje y crecimiento, la ausencia de planes estructurados de formación docente constituye uno de los principales vacíos institucionales. La implementación de programas sistemáticos de capacitación permitiría alcanzar un mínimo de cuarenta horas anuales de formación docente por profesor (ACO1), incrementar la integración de tecnologías en el aula hasta niveles cercanos al 70 % del cuerpo docente (ACO2) y mejorar el índice de clima laboral institucional hacia valores iguales o superiores al 80 % (ACO3). Todo ello en coherencia con los indicadores definidos en el modelo estratégico (Rompho, 2020).

## DISCUSIÓN

Los hallazgos de este estudio evidencian la ausencia de un sistema formal de gestión estratégica institucional en la institución escolar analizada, particularmente, en ámbitos críticos como la planificación financiera, la medición sistemática de la satisfacción de las

familias, la estandarización de procesos y el desarrollo profesional docente. Estas debilidades no constituyen situaciones aisladas, sino que reproducen patrones ampliamente documentados en la literatura sobre gestión en organizaciones educativas concebidas como organizaciones de servicios.

Desde la perspectiva financiera, la alta dependencia de la matrícula como única fuente de ingresos y la inexistencia de metas presupuestales estructuradas limitan la sostenibilidad institucional y la capacidad de anticipación estratégica. Estos resultados son coherentes con lo señalado por Pereira y Melão (2012) y Camilleri (2021), quienes destacan que, en contextos educativos, la gestión financiera suele orientarse a la operatividad inmediata más que a la planificación estratégica de mediano y largo plazo. El presente estudio refuerza esta evidencia al mostrar que la ausencia de herramientas de control estratégico impide vincular los recursos financieros con los objetivos institucionales.

En la perspectiva de clientes, los resultados confirman una tensión recurrente entre cercanía relacional e informalidad en la gestión. Aunque las relaciones con estudiantes y familias son valoradas como un activo institucional, la ausencia de mecanismos sistemáticos de evaluación de la satisfacción limita la transformación de dichas relaciones en información estratégica. Este hallazgo coincide con lo planteado por Saksono y Bernardus (2023), quienes advierten que la falta de instrumentos formales reduce la capacidad de aprendizaje organizacional y la mejora basada en evidencia.

Respecto de los procesos internos, la informalidad operativa y la escasa utilización de manuales y procedimientos reflejan una débil articulación entre planificación, ejecución y control. Tal como señalan Mendes y Alves (2023), esta desconexión constituye una de las principales barreras para la adopción efectiva del *balanced scorecard* en contextos educativos. Asimismo, la limitada participación de los actores institucionales en los procesos estratégicos coincide con los hallazgos de Falqueto et al. (2020), quienes subrayan la importancia de una gobernanza participativa para lograr coherencia estratégica en organizaciones intensivas en servicios.

En la perspectiva de aprendizaje y crecimiento, la ausencia de planes estructurados de formación docente y de incentivos para la innovación pedagógica evidencia una concepción limitada del capital humano como factor estratégico. Este resultado se alinea con lo expuesto por Coskun y Nizaeva (2023), quienes destacan que el desarrollo profesional y la gestión del conocimiento constituyen pilares fundamentales del desempeño organizacional cuando se integran de manera explícita en sistemas de gestión estratégica como el BSC.

Este abordaje se alinea con propuestas metodológicas que buscan fortalecer la consistencia y rigurosidad en el diseño de mapas estratégicos bajo el marco del BSC, especialmente cuando se incorporan técnicas estructuradas para analizar relaciones entre objetivos (López-Ospina et al., 2022).

A diferencia de investigaciones previas centradas principalmente en instituciones de educación superior (Lassoued, 2018; Quesado et al., 2013) —donde se han consolidado marcos institucionalizados de planificación estratégica, gobernanza y evaluación del desempeño (Fumasoli & Hladchenko, 2023)—, el presente estudio amplía la evidencia empírica sobre la aplicabilidad del BSC en instituciones educativas escolares, a fin de atender sus particularidades organizacionales, culturales y operativas. En relación con lo anterior, los resultados complementan la revisión sistemática de Mendes y Alves (2023) al demostrar que la implementación del BSC en escuelas es viable cuando se adapta a las condiciones locales y se concibe como un sistema integral de gestión, más allá de una herramienta de medición aislada.

El análisis estadístico exploratorio reforzó estas interpretaciones al evidenciar que no existen diferencias significativas en la relevancia percibida de las cuatro perspectivas del BSC. Este resultado sugiere una necesidad sistémica de mejora, en la cual las dimensiones financieras, de clientes, procesos internos, y aprendizaje y crecimiento deben abordarse de manera equilibrada e interdependiente. A diferencia de estudios en los que se observa la predominancia de una perspectiva específica (Coskun & Nizaeva, 2023), los hallazgos de este trabajo respaldan el diseño de un modelo estratégico integral coherente con la lógica original del BSC.

En este contexto, el modelo estratégico propuesto, estructurado a partir de quince objetivos distribuidos en las cuatro perspectivas del BSC y operacionalizados mediante indicadores preliminares, se configura como un aporte aplicado a la ingeniería industrial al ofrecer una estructura formal para la planificación, el seguimiento y la evaluación del desempeño en organizaciones educativas entendidas como organizaciones de servicios.

A diferencia de investigaciones previas que reportan una predominancia de determinadas perspectivas dentro del BSC —particularmente financiera o de aprendizaje y crecimiento— en contextos educativos (Coskun & Nizaeva, 2023), el presente estudio evidencia una distribución estadísticamente homogénea de menciones entre las cuatro dimensiones ( $\chi^2(3) = 0,34; p = 0,952$ ). Este hallazgo cuantitativo sugiere que las debilidades institucionales no se concentran en un ámbito específico, sino que responden a una problemática sistémica.

El carácter innovador del modelo propuesto radica en su triple nivel de estructuración: diagnóstico cualitativo sistematizado por perspectivas del BSC, validación semicuantitativa exploratoria para evitar sesgos interpretativos y operacionalización en iniciativas estratégicas concretas alineadas con indicadores y mecanismos de seguimiento. Esta integración metodológica trasciende la aplicación tradicional del BSC como herramienta descriptiva y lo posiciona como un sistema formal de gestión estratégica replicable en instituciones educativas con estructuras organizacionales similares.

Desde una perspectiva cuantitativa aplicada, el modelo propuesto permite traducir las brechas identificadas en escenarios de mejora medible del desempeño institucional. En particular, la dependencia total de los ingresos por matrícula (100 %) podría reducirse mediante estrategias de diversificación hasta valores cercanos al 10 % en fuentes complementarias, la ausencia de medición de la satisfacción de familias evolucionar hacia niveles iguales o superiores al 85 % y la falta de control en procesos internos transformarse en niveles de cumplimiento del plan operativo anual cercanos o superiores al 85 %. Asimismo, en la dimensión de aprendizaje y crecimiento, la inexistencia de planes estructurados de formación docente podría convertirse en un sistema institucional con al menos cuarenta horas anuales de capacitación por docente y una integración de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en el aula superior al 70 %. Estos valores, derivados de los indicadores definidos en el modelo, evidencian que la propuesta incorpora una lógica de mejora cuantificable del desempeño institucional.

Desde una perspectiva aplicada, la implementación del modelo estratégico basado en el BSC requiere una secuencia estructurada que garantice su apropiación institucional. En una primera etapa, es fundamental realizar un proceso de alineación estratégica con los directivos y docentes orientado a socializar los objetivos definidos en cada perspectiva y consensuar indicadores específicos, metas cuantificables, responsables y periodicidad de medición. Posteriormente, dichos indicadores deben integrarse formalmente en los instrumentos de planificación existentes como planes operativos anuales y presupuestos, lo que asegura coherencia entre planificación, ejecución y control, y evita que el modelo se convierta en un ejercicio meramente declarativo.

En una fase de consolidación, se recomienda establecer un mecanismo permanente de seguimiento estratégico mediante la creación de un comité institucional encargado de evaluar periódicamente el desempeño, analizar desviaciones y proponer acciones correctivas. Asimismo, la institucionalización del modelo exige incorporar reportes periódicos de resultados y espacios de retroalimentación participativa que fortalezcan la cultura organizacional orientada a la mejora continua. De esta manera, el BSC trasciende su función diagnóstica inicial y se configura como un sistema dinámico de gestión estratégica capaz de sostener procesos de mejora en el mediano y largo plazo.

## CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio confirman la necesidad de implementar modelos de gestión estratégica ajustados al contexto de las instituciones educativas escolares, concebidas como organizaciones de servicios. La ausencia de sistemas formales de planificación, seguimiento y evaluación del desempeño limita la articulación entre la misión institucional, los procesos administrativos y pedagógicos, y los resultados organizacionales. En este sentido, el análisis evidenció vacíos estructurales en las cuatro perspectivas del *balanced*

*scorecard* relacionados con la falta de metas financieras explícitas, la inexistencia de mecanismos sistemáticos de evaluación de la satisfacción de las familias, debilidades en la estandarización de procesos y una planificación insuficiente del desarrollo profesional docente.

El análisis semicuantitativo complementario permitió identificar una distribución relativamente homogénea de las percepciones asociadas a las cuatro perspectivas del BSC sin diferencias estadísticamente significativas entre ellas. Este hallazgo respalda la pertinencia de un enfoque integral y equilibrado de gestión en el cual las dimensiones financieras, de clientes, procesos internos y aprendizaje y crecimiento se aborden de manera interdependiente, coherente con la lógica sistémica del BSC y con los principios de la ingeniería industrial aplicados a organizaciones de servicios.

Como respuesta a estos hallazgos, se diseñó un modelo estratégico institucional compuesto por quince objetivos organizados según las perspectivas del BSC, complementados con indicadores preliminares, fuentes de información y frecuencias de seguimiento. Este modelo constituye un aporte aplicado a la gestión de instituciones educativas escolares al ofrecer una estructura formal para la planificación estratégica, el control de gestión y la toma de decisiones orientada a resultados, con énfasis en la mejora continua y la alineación organizacional.

Desde el punto de vista teórico, el estudio contribuye a reducir la brecha existente en la literatura sobre la aplicación del BSC en educación básica en América Latina, lo que demuestra su adaptabilidad más allá del ámbito universitario. Desde una perspectiva práctica, el modelo propuesto ofrece una herramienta replicable y flexible, susceptible de ser ajustada a instituciones educativas con características organizacionales similares.

Entre las limitaciones del estudio se reconoce el carácter de estudio de caso único, lo que restringe la generalización de los resultados. Adicionalmente, el modelo propuesto no fue implementado ni evaluado longitudinalmente, por lo que sus efectos en el desempeño institucional no pudieron ser medidos empíricamente.

Como líneas futuras de investigación, se propone aplicar el modelo en instituciones educativas comparables, desarrollar estudios longitudinales que evalúen su impacto en el desempeño organizacional y explorar enfoques mixtos apoyados en plataformas tecnológicas o herramientas de inteligencia de negocios que faciliten la automatización del seguimiento de indicadores estratégicos. Finalmente, se considera relevante profundizar en el fortalecimiento de las capacidades institucionales para la toma de decisiones basada en datos y la consolidación de una cultura organizacional orientada a la mejora continua.

## **CONFLICTOS DE INTERÉS**

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

**David Uribe Suárez:** conceptualización, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, supervisión, validación, visualización, redacción (revisión y edición). **Yeris Baquero Bolaños:** conceptualización, *data curation*, investigación, metodología, *software*, validación, escritura (borrador original). **José Ricardo Fuentes Jaramillo:** *data curation*, análisis formal, investigación, visualización, escritura (borrador original).

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE IA GENERATIVA

Los autores utilizaron herramientas de IA generativa únicamente para mejorar la redacción, gramática y claridad del manuscrito. La interpretación de resultados, análisis y conclusiones corresponden exclusivamente a los autores.

## REFERENCIAS

- Benková, E., Gallo, P., Balogová, B., & Nemeč, J. (2020). Factors affecting the use of balanced scorecard in measuring company performance. *Sustainability*, 12(3), 1178. <https://doi.org/10.3390/su12031178>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Camilleri, M. A. (2021). Using the balanced scorecard as a performance management tool in higher education. *Management in Education*, 35(1), 10-21. <https://doi.org/10.1177/0892020620921412>
- Coskun, A., & Nizaeva, M. (2023). Strategic performance management using the balanced scorecard in educational institutions. *Open Education Studies*, 5(1), 20220198. <https://doi.org/10.1515/edu-2022-0198>
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2016). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches*. Sage.
- Mendes, I. de J. A., Jr., & Alves, M. D. C. (2023). The balanced scorecard in the education sector: A literature review. *Cogent Education*, 10(1), 2160120. <https://doi.org/10.1080/2331186X.2022.2160120>
- Denzin, N. K. (2017). *El acto de investigación: una introducción teórica a los métodos sociológicos*. Routledge.
- Falqueto, J. M. Z., Hoffmann, V. E., Gomes, R. C., & Onoyama Mori, S. S. (2020). Strategic planning in higher education institutions: what are the stakeholders' roles in

- the process? *Higher Education*, 79(6), 1039-1056. <https://doi.org/10.1007/s10734-019-00455-8>
- Fumasoli, T., & Hladchenko, M. (2023). Strategic management in higher education: Conceptual insights, lessons learned, emerging challenges. *Tertiary Education and Management*, 29(4), 331-339. <https://doi.org/10.1007/s11233-024-09134-5>
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2002). *El cuadro de mando integral: the balanced scorecard*. Gestión 2000.
- Kumar, A., Brar, V., Chaudhari, C., & Raibagkar, S. S. (2023). Performance management through the balanced scorecard approach by the South African Revenue Service. *Public Organization Review*, 23(3), 1143-1165. <https://doi.org/10.1007/s11115-022-00646-5>
- Lassoued, K. (2018). Balanced scorecard implementation in higher education: An Emirati perspective. *Corporate Ownership & Control*, 15(3), 205-216. <https://doi.org/10.22495/cocv15i3c1p5>
- Lee, S., Costello, F. J., & Lee, K. C. (2021). Hierarchical balanced scorecard-based organizational goals and the efficiency of controls processes. *Journal of Business Research*, 132, 270-288. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.038>
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. Sage.
- López-Ospina, H., Pardo, D., Rojas, A., Barros-Castro, R., Palacio, K., & Quezada, L. (2022). A revisited fuzzy DEMATEL and optimization method for strategy map design under the BSC framework: selection of objectives and relationships. *Soft Computing*, 26(14), 6619-6644. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07042-7>
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2014). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook*. Sage.
- Pereira, M. M., & Melão, N. F. (2012). The implementation of the balanced scorecard in a school district: Lessons learned from an action research study. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 61(8), 919-939. <https://doi.org/10.1108/17410401211277156>
- Quesado, P. R., Guzmán, B. A., & Rodrigues, L. L. (2013). Balanced scorecard adoption in Portuguese organizations: Contingent and institutional variables. *Intangible Capital*, 9(2), 491-525. <https://doi.org/10.3926/ic.451>
- Rafiq, M., Zhang, X., Yuan, J., Naz, S., & Maqbool, S. (2020). Impact of a balanced scorecard as a strategic management system tool to improve sustainable development: Measuring the mediation of organizational performance through PLS-smart. *Sustainability*, 12(4), 1365. <https://doi.org/10.3390/su12041365>

- Rompho, N. (2020). The balanced scorecard for school management: Case study of Thai public schools. *Measuring Business Excellence*, 24(3), 285-300. <https://doi.org/10.1108/MBE-02-2019-0012>
- Saksono, L. A., & Bernardus, D. (2023). Design of balanced scorecard as a school's performance measurement. *Binus Business Review*, 14(2), 171-183. <https://doi.org/10.21512/bbr.v14i2.8901>
- Saldaña, J. (2016). *The coding manual for qualitative researchers*. Sage.
- Ta, T. T., Doan, T. N., Tran, H. N., Dam, T. A., & Pham, T. M. Q. (2022). Factors affecting the application of balanced scorecard to enhance operational efficiency of listed companies: The case of Vietnam. *Cogent Business & Management*, 9(1), 2149146. <https://doi.org/10.1080/23311975.2022.2149146>
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications*. Sage.



**CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA**

---

**Science and Technology**



# EVALUACIÓN DEL EFECTO DE ADICIÓN DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO COMO AGENTE OXIDANTE EN EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN CIANURADA PARA MEJORAR LA EXTRACCIÓN DE ORO

WASHINGTON OMAR ESPINOZA RAMON\*  
<https://orcid.org/0000-0003-4151-2347>

BRAULIO ABSALÓN MADRID CELI  
<https://orcid.org/0000-0002-8494-1304>

GARY HITLER MUÑOZ BRAVO  
<https://orcid.org/0000-0001-5860-8244>

CARMÍN AYDEE DE GRACIA PÉREZ  
<https://orcid.org/0000-0003-2079-9748>

SUSANA ELIZABETH BLACIO TORO  
<https://orcid.org/0000-0003-0619-9578>

Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud,  
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Recibido: 3 de marzo del 2026 / Aceptado: 31 de marzo del 2026

Publicado: 15 de junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8636>

**RESUMEN.** El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la adición de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) como agente oxidante en la lixiviación cianurada para mejorar la recuperación de oro. Se realizaron tres pruebas adicionando progresivamente tres volúmenes diferentes de  $H_2O_2$  al 50 % (60 mL, 75 mL y 90 mL) durante las 12 horas de proceso y tres volúmenes de cianuro de sodio (NaCN) (198, 188 y 158 mL). Para el control, se adicionó 198 mL de NaCN (10%).

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: [wespinoza@utmachala.edu.ec](mailto:wespinoza@utmachala.edu.ec); [bmadrid@utmachala.edu.ec](mailto:bmadrid@utmachala.edu.ec); [gmunoz@utmachala.edu.ec](mailto:gmunoz@utmachala.edu.ec); [cgracia@utmachala.edu.ec](mailto:cgracia@utmachala.edu.ec); [sblacio@utmachala.edu.ec](mailto:sblacio@utmachala.edu.ec)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Se pudo observar que, al incrementar progresivamente la adición de  $H_2O_2$  en un 25 %, disminuía el consumo de NaCN y se incrementaban los contenidos de oro (Au) total. Los consumos de NaCN en el control fueron de 256 y disminuyó en P1: 198, P2: 188 y P3: 158 mL/h. La recuperación de Au se realizó utilizando carbón activado para la adsorción del metal. En el control, se obtuvieron 1,82 g/m<sup>3</sup>, prueba 1: 1,86, prueba 2: 2,05 y prueba 3: 2,75 g/m<sup>3</sup>. En conclusión, la adición de  $H_2O_2$  favorece la disminución del consumo de NaCN en el proceso e incrementa en un 51 % los porcentajes de recuperación de Au con respecto al control.

PALABRAS CLAVE: adsorción / cianuración / oro / peróxido de hidrógeno / cianuro de sodio

## EVALUATION OF THE EFFECT OF ADDING HYDROGEN PEROXIDE AS AN OXIDIZING AGENT IN THE CYANIDE LEACHING PROCESS TO IMPROVE GOLD RECOVERY

ABSTRACT. The objective of this study was to evaluate the effect of adding hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) as an oxidizing agent in cyanide leaching to improve gold recovery. Three tests were conducted, progressively adding three different volumes of 50 %  $H_2O_2$  (60, 75, and 90 mL) over the 12-hour process, along with three volumes of NaCN (198, 188, and 158 mL). A control of 198 mL of NaCN (10 %) was added. It was observed that increasing the  $H_2O_2$  addition decreased NaCN consumption and increased total gold content. The recovery was carried out using activated carbon to adsorb the metal. In the control, 1,82 g/m<sup>3</sup> was obtained; in test 1, 1,86 g/m<sup>3</sup>; in test 2, 2,05 g/m<sup>3</sup>; and in test 3, 2,75 g/m<sup>3</sup>. NaCN consumption decreased to: control 256 mL/h, test 1: 198 mL/h, test 2: 188 mL/h, and test 3: 158 mL/h. The increase in  $H_2O_2$  was 25 % in each of the tests. In conclusion, the addition of hydrogen peroxide favors a decrease in NaCN consumption in the process and increases the Au recovery percentages.

KEYWORDS: adsorption / cyanidation / gold / hydrogen peroxide / sodium cyanide

## INTRODUCCIÓN

El oro es un metal precioso, tradicionalmente conocido por sus usos en joyería, como conector eléctrico y como moneda. En los últimos tiempos, el oro se ha utilizado cada vez más como conector eléctrico resistente a la corrosión en ordenadores y otros dispositivos eléctricos (Karppinen et al., 2024). Los recursos minerales del mundo que contienen oro (Au) se están agotando, lo que ha despertado el interés en minerales de baja ley y de composición compleja. El mineral de baja ley de Au se refiere a rocas complejas que contienen concentraciones relativamente bajas de oro; normalmente, contiene entre 1-5 gramos de Au por tonelada (g/t) (Costa et al., 2022). A medida que disminuye el contenido de oro en los minerales y aumentan los costes económicos y medioambientales de la energía, los métodos de extracción de metales menos intensivos en energía resultan cada vez más atractivos (Surimbayev et al., 2024). El procesamiento de minerales de baja ley ofrece un enfoque sistemático para caracterizar yacimientos minerales y residuos mineros con el fin de identificar vías de procesamiento adecuadas y predecir su comportamiento potencial durante el tratamiento (Baloyi et al., 2024).

La composición química de los minerales de baja ley de oro, generalmente, son ricos en pirita ( $\text{FeS}_2$ ), arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), grafito, galena ( $\text{PbS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y varios metales en formas de traza como arsénico (As), plomo (Pb), cobre (Cu), antimonio (Sb), telurio (Te), plata (Ag), zinc (Zn), bismuto (Bi), selenio (Se), mercurio (Hg) y oro (Au). Ello los convierte en una fuente atractiva de recursos (Baloyi et al., 2024). La extracción de Au es un proceso crucial en la industria minera, donde la lixiviación cianurada se destaca como uno de los métodos más comunes para recuperar este valioso metal a partir de minerales de baja ley. Históricamente, el cianuro ha sido el reactivo predominante en la lixiviación de oro debido a su efectividad en disolver y extraer el metal precioso de los minerales. Sin embargo, su uso plantea serias preocupaciones ambientales y de salud pública debido a su toxicidad y al riesgo de contaminación de cuerpos de agua y suelos (Zhang, Cui, Wang et al., 2022).

En ese sentido, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la adición de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) como agente oxidante y la disminución del consumo de cianuro de sodio ( $\text{NaCN}$ ) en la lixiviación del Au con el fin de incrementar los porcentajes de extracción en minerales de baja ley.

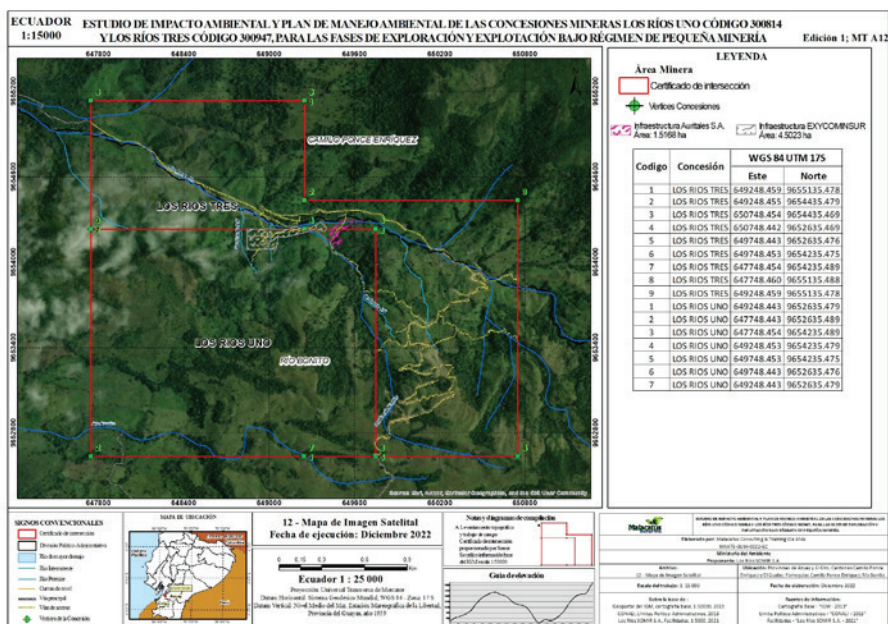
## METODOLOGÍA

Para evaluar el efecto de la adición de peróxido de hidrógeno en la lixiviación cianurada de oro, se utilizó mineral de mena molido ( $\leq 250 \mu\text{m}$ ) de baja ley de oro ( $\approx 5 \text{ g/t}$ ), cuyos componentes principales son cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) 50 % y pirita ( $\text{FeS}_2$ ) 3 % —proporcionados por la Sociedad Minera Exycominsur (El Oro, Ecuador)—, hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ , 99 %), cianuro (CN) (100 %), peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) (50 %), nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) (100 %) y yoduro de potasio (KI) (100 %).

Los experimentos se desarrollaron en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala y el material objeto de estudio fue recolectado de la planta de la Sociedad Minera Exycominsur dentro del área minera Ríos Uno, en el sitio de San Vicente, entre las Provincias de El Oro y Azuay. A continuación, en la Figura 1 se muestra la localización del lugar de extracción de las muestras.

Figura 1

Ubicación geográfica del punto de recolección de la materia prima



Nota. De “Estudio de impacto ambiental y plan de manejo ambiental de las concesiones mineras Los Ríos Uno código 300814 y Los Ríos Tres código 300947, para las fases de exploración y explotación bajo régimen de pequeña minería, provincias: El Oro-Azuay”, por Malacatus, 2023 (<https://maatecalidadambiental.ambiente.gob.ec/index.php/2026/02/05/estudio-de-impacto-ambiental-y-plan-de-manejo-ambiental-de-las-concesiones-mineras-los-rios-uno-codigo-300814-y-los-rios-tres-codigo-300947-para-las-fases-de-exploracion-y-explotacion-bajo-r/>).

**Diseño del experimento**

Con el objetivo de maximizar la recuperación de oro del mineral, se varió el volumen de peróxido de hidrógeno (50 %) adicionado tres volúmenes diferentes (10 mL, 30 mL y 50 mL). Con ello, se buscó garantizar que la reacción sea completa, tenga efecto positivo sobre la reducción del consumo de cianuro de sodio y mejore la eficiencia en la extracción de Au, tal como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1***Diseño del experimento de lixiviación*

Experimentos	mL		Au (g/m <sup>3</sup> )
	NaCN (10 %)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (50 %)	
Control	98 mL	0 mL	X
Prueba 1	98 mL	10 mL	X
Prueba 2	98 mL	30 mL	X
Prueba 3	98 mL	50 mL	X

Por la composición del mineral de baja ley (5 g/t) utilizado en este proceso, se adicionaron bajos volúmenes de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, tal como lo sugieren investigaciones en las zonas mineras del sur de Ecuador. Estas señalan que, utilizando bajas concentraciones de este reactivo, lograron obtener incrementos en los porcentajes de recuperación de oro desde 48,52 % al 68,85 % (Flores et al., 2025; Valarezo Tenesaca et al., 2024).

Para establecer la eficiencia del proceso de lixiviación se utilizaron las variables que a continuación se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2***Variables de la investigación*

Variables	Volumen
Controlada	NaOH 10 % (98 mL)
Independiente	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 50 % (0-50 mL)
Dependiente	[Au] g/M <sup>3</sup>

El propósito de esta secuencia de pruebas es identificar la concentración óptima de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> que maximiza la disolución del oro sin causar una degradación excesiva del cianuro y reducir su consumo.

### Pretratamiento del mineral de baja ley

Se realizó una reducción de tamaño de partícula mediante fraccionamiento mecánico utilizando un molino de bolas (Metso plus) durante dos horas hasta llegar a pulverizar el material (250 µm). Luego, se realizó un lavado y, posteriormente, se dejó sedimentar el material.

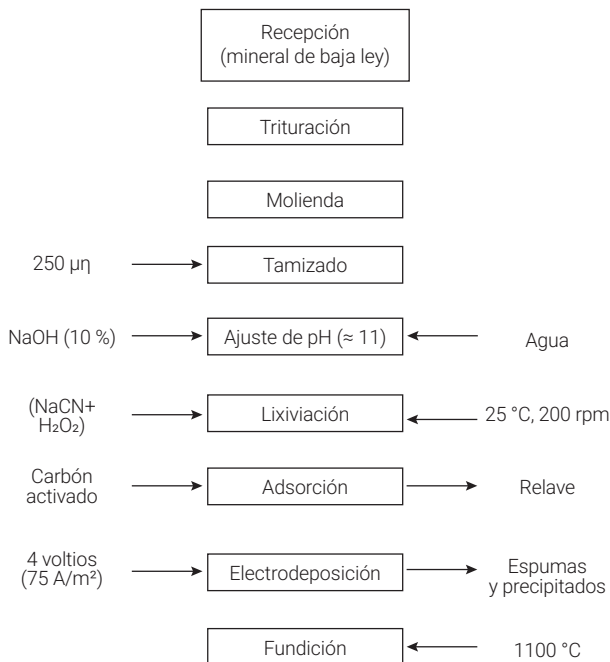
### Proceso de lixiviación

Se preparó una solución acuosa de mineral al 30 %, la cual se mantuvo en agitación constante a 200 rpm. Posteriormente, se ajustó el pH ≈ 11 mediante la adición de una solución de NaOH al 10 % con el objetivo de mantener activo el ion CN<sup>-</sup>, disolver el oro y evitar la

formación de gases tóxicos (HCN). A continuación, en la Figura 2 se presenta el diagrama que muestra el procedimiento desarrollado para la extracción de oro.

**Figura 2**

*Diagrama de flujo del proceso de lixiviación cianurada para la extracción de oro*



Una vez receiptado el mineral de baja ley ( $5 \text{ g/m}^3$ ), se realizó la trituración, donde el mineral se fragmenta en tamaños más pequeños. Luego, pasó a la molienda, una etapa más fina que permite aumentar considerablemente el área superficial. Esto es esencial, ya que incrementa el área de contacto entre el oro y las soluciones químicas que se utilizarán.

Una vez obtenido el material molido, este es sometido a tamizado asegurando que las partículas tengan un tamaño aproximado de  $\leq 250 \mu\text{m}$ . Trabajar con este tamaño de partícula es importante porque influye directamente en la eficiencia de la lixiviación. La solución que ingresa a lixiviación debe tener un pH adecuado para evitar la formación de gases, de reacciones parasitarias y de HCN tóxico. Para ello, se ajusta el pH. En esta etapa, se adiciona NaOH (10 %) y el agua debe alcanzar un  $\text{pH} \approx 11$ .

Con el pH controlado, se da paso a la lixiviación, una etapa esencial del proceso. Aquí, se agrega un volumen inicial de 98 mL de solución de cianuro de sodio (NaCN) junto con un volumen de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) que actúa como agente oxidante. De preferencia, la temperatura debe mantenerse a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  con agitación constante de 200 rpm.

La solución rica en Au se dirige luego a la adsorción, donde se utiliza carbón activado para retener el oro disuelto.

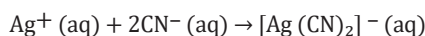
## Métodos analíticos

### *Determinación de pH*

La lectura del pH de las soluciones lixiviantes que contuvieron cianuro de sodio y peróxido de hidrógeno se realizó mediante un multiparámetro *edge®* (Hanna Instruments, EE. UU.) provisto de electrodo de pH de vidrio para evitar deterioro por el alto valor de pH (Duru & Nesbitt, 2021).

### *Cuantificación de cianuro (método Liebig)*

El método Liebig se fundamenta en la formación del complejo dicianoargentato de la reacción del ion plata con el cianuro. A continuación, en la siguiente ecuación, se presenta la reacción estequiométrica de este proceso (Duru & Nesbitt, 2021; Senanayake, 2006):



Después de una hora de proceso, se toma la primera alícuota de 10 mL de la solución en análisis para realizar la titulación y calcular el cianuro libre en la lixiviación. Se utiliza  $\text{AgNO}_3$  como reactivo y KI como indicador. Inicialmente, filtramos la alícuota para eliminar impurezas y la vertemos en un matraz limpio. Luego, añadimos tres gotas de KI. Posteriormente, agregamos la solución de  $\text{AgNO}_3$  gota a gota, mezclando bien tras cada adición, hasta observar un cambio de color de transparente a amarillo tenue, lo cual indica el punto final de la titulación. En ese momento, registramos el volumen de  $\text{AgNO}_3$  utilizado, dato esencial para calcular la concentración de cianuro libre en la muestra (Nava-Alonso et al., 2007).

### *Cuantificación de oro durante el proceso de lixiviación*

La digestión de la muestra se realizó utilizando agua regia. Por cada gramo de muestra tostada, se añadió 50 mL de reactivo (Wang et al., 2025).

Para la determinación cuantitativa de oro total, se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica a la llama (Shimadzu AA.7800) que permite medir la concentración de analito de interés en una solución. El oro se determinó a una longitud de onda de 242,8 nm tal como lo establece el Standard Method 3111: Metals by Flame Atomic Absorption Spectrometry (FAAS) (Buitrón et al., 2021).

### *Cuantificación de oro total*

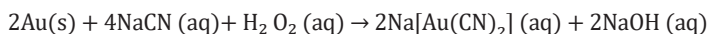
La mezcla se calentó a 1100 °C durante dos horas, utilizando como fundente bórax (1:1 en relación al concentrado) para permitir las transformaciones químicas deseadas. Esta configuración tuvo como objetivo reducir los compuestos de Au a Au elemental y eliminar las impurezas.

### Análisis de varianza (ANOVA)

Para establecer si existió una diferencia significativa ( $p \leq 0,05$ ) en la obtención de oro total entre las medias de los experimentos estudiados, se realizó un análisis de varianza unidireccional. Para determinar si los experimentos diferían entre sí, se utilizó la prueba HSD de Tukey.

## RESULTADOS

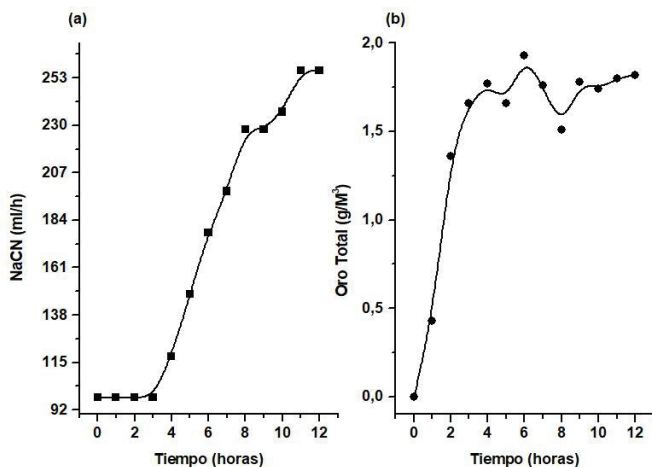
La lixiviación de oro con cianuro de sodio se desarrolló adicionando tres volúmenes diferentes de  $H_2O_2$  al 50 % (60 mL, 75 mL y 90 mL), el cual actúa como un fuerte oxidante en este proceso (Kenzhaliyev et al., 2023). A continuación, se muestra la reacción de este proceso.



En este proceso, fue esencial mantener la solución a  $pH \approx 11$  para mejorar la solubilidad, prevenir la precipitación del metal de interés y minimizar reacciones parasitarias. A continuación, en la Figura 3, se presentan los comportamientos de los consumos de NaCN durante el tiempo de lixiviación de Au en la muestra control.

Figura 3

Consumo de NaCN durante el proceso de lixiviación



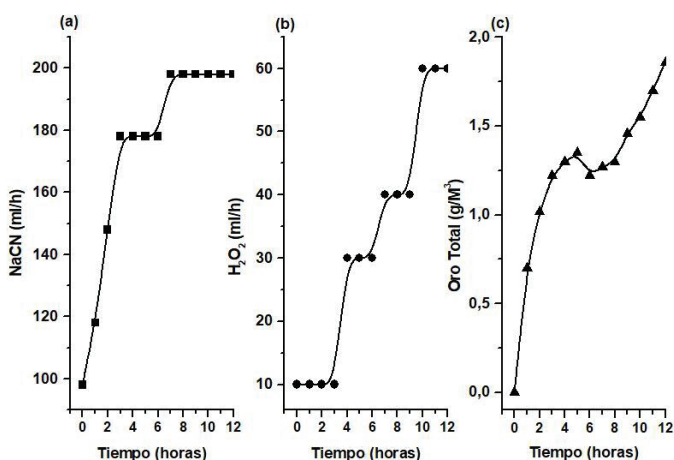
Se observa que el consumo de NaCN, durante las tres primeras horas de proceso, se mantiene en 98 mL/h (a). Luego, experimenta un consumo constante durante ocho horas de lixiviación y se estabiliza en 256,5 mL/h, con lo cual alcanza 1,82 g/m³ de oro total (b). Ello indica que a mayor adición de NaCN, mayor concentración de oro total.

### Efecto de la adición de $H_2O_2$ para reducir el consumo de NaCN

En la prueba 1, la adición de  $H_2O_2$  incrementa la velocidad de lixiviación al ser un oxidante más fuerte que el oxígeno. A continuación, en la Figura 4, se muestra el efecto de la adición de  $H_2O_2$  en la concentración de oro obtenido.

Figura 4

Consumo de NaCN (a), adición de  $H_2O_2$  (b) y obtención de oro total (c)

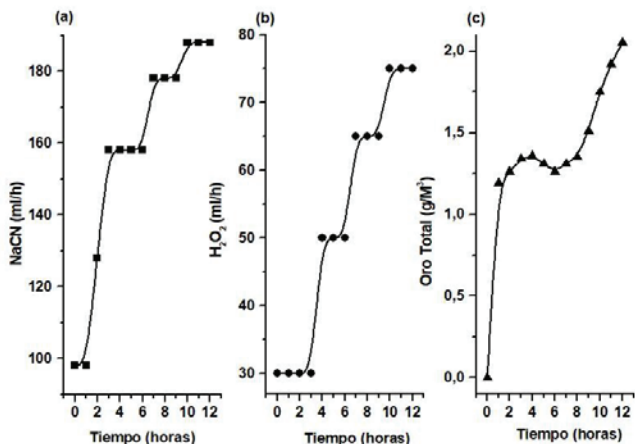


Se puede ver que el consumo de NaCN es creciente durante las tres primeras horas y el consumo de  $H_2O_2$  es constante (10 mL), lo que indica que a mayor adición de NaCN, menor consumo de oxidante. La disminución en el consumo de NaCN fue de 22,8 %, debido a la adición de 60 mL de  $H_2O_2$  al 50 % con respecto al control, y la obtención de oro total aumentó un 2,19 %. Para ajustar el pH de la solución ( $\approx 11$ ), se adicionó 20 mL de solución de hidróxido de sodio al 10 % y se mantuvo constante.

En la prueba 2, la adición de un volumen medio de  $H_2O_2$  (50 %) ha demostrado reducciones significativas en el consumo de NaCN e incrementos significativos en la obtención de oro total con respecto a los experimentos sin adición de oxidante. A continuación, en la Figura 5, se presentan los valores de oro final obtenido.

**Figura 5**

*Consumo de NaCN (a), adición de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (b) y obtención de oro total (c)*

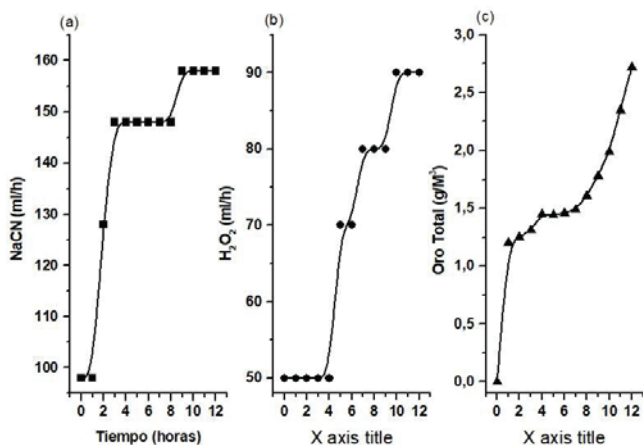


En esta figura, se puede apreciar que la adición de una concentración media de peróxido de hidrógeno (30 mL) durante las cuatro primeras horas de lixiviación favorece la liberación de oro desde el mineral al medio lixiviante. En esta prueba, se puede establecer que, al adicionar un volumen final de 75 mL de solución de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50 %, el consumo de NaCN disminuye un 26,7 % y el oro total aumenta en 12,63 % con respecto al control.

La prueba 3 (Figura 6) muestra los resultados de los efectos de la adición de 90 mL de solución de peróxido de hidrógeno, el mayor volumen de concentración de las tres pruebas, durante doce horas de lixiviación cianurada para la extracción de oro.

**Figura 6**

*Consumo de NaCN (a), adición de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (b) y obtención de oro total (c)*



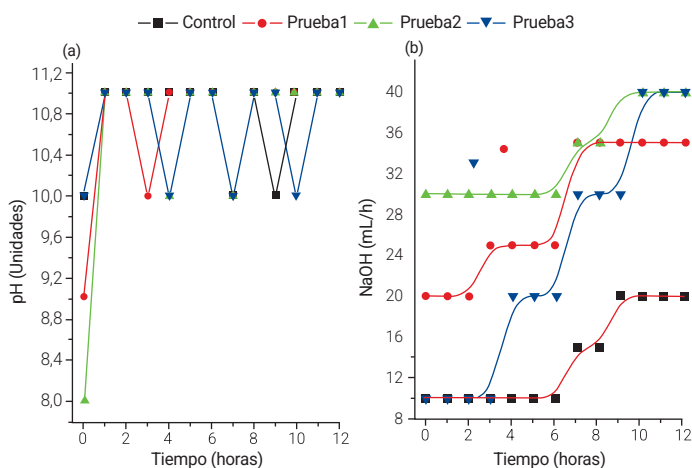
En esta prueba, se pudo establecer que, al adicionar un volumen más alto (90 mL de solución de  $H_2O_2$  al 50 %), el consumo de NaCN disminuye un 38,4 % y el oro total aumenta en 51 % con respecto al control. Los minerales de baja ley contienen altas concentraciones de piritita ( $FeS_2$ ), las cuales también consumen oxidantes y cianuro, por lo cual se hace imprescindible la adición de mayores volúmenes de  $H_2O_2$ .

### Comportamiento del pH durante el proceso de lixiviación de oro

Para evitar tanto la volatilización del NaCN en forma de ácido cianhídrico como el desarrollo de reacciones parasitarias en el proceso de lixiviación de oro, es de vital importancia mantener el pH de la solución a  $\approx 11$ . A continuación, en la Figura 7, se muestra el consumo de NaOH y comportamiento del pH.

**Figura 7**

*El pH de las soluciones (a) y los mL de NaOH adicionados al proceso (b)*



Debido a la variada composición de los minerales utilizados en el proceso, las soluciones presentaron diferentes valores de pH. Fue necesario ajustar el pH mediante la adición de diferentes volúmenes de hidróxido (10 %). En la mayoría de los casos, se inició añadiendo 30 mL a una solución con pH inicial de 8 y se culminó con un volumen total de 40 mL. En la prueba 3, donde se adicionó mayor cantidad de peróxido de hidrógeno, se requirió mayor cantidad de hidróxido de sodio (40 mL) debido al constante descenso del pH ocasionado por la liberación de  $H^+$  por parte del peróxido de hidrógeno.

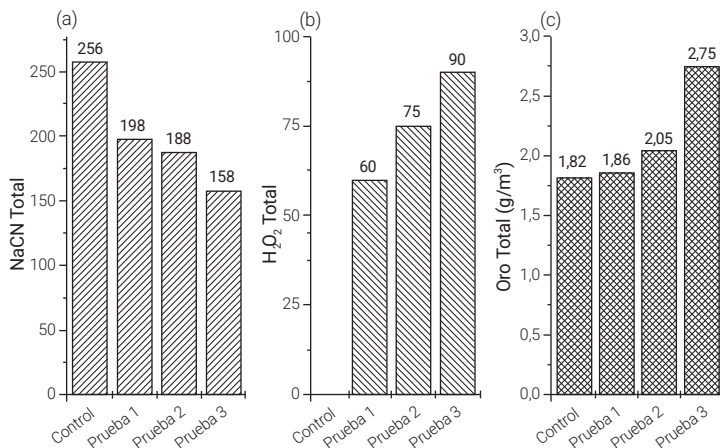
### Evaluación del consumo de reactivos y la producción de oro

Debido a la reacción de oxidorreducción que ocurren en el proceso de obtención de oro, es fundamental evaluar los consumos de reactivos y la formación de productos.

A continuación, en la Figura 8, se muestran los consumos totales de NaCN y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en la extracción total de oro total.

**Figura 8**

*Evaluación del consumo total de NaCN (a), consumo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (b) y oro total obtenido (c)*



Se puede apreciar que la adición de peróxido de hidrógeno al proceso hidrometalúrgico de la obtención de oro tiene un efecto positivo debido a la reducción de NaCN: hasta en un 38 % en el mayor de los casos. Asimismo, se observa que genera un incremento en la obtención de oro (51 %) con respecto al control, lo cual representa un beneficio técnico y económico del proceso.

**Análisis de varianza del proceso**

Mediante el uso de Origin.50, se realizó el análisis estadístico para evaluar el efecto de la adición de peróxido de hidrógeno durante el proceso de lixiviación para la extracción de oro y establecer si existió diferencia significativa entre los cuatro experimentos estudiados. A continuación, en la Tabla 3, se muestran los datos estadísticos obtenidos.

**Tabla 3**

*Análisis ANOVA*

Fuente	Media	Varianza	N
Control	1,82	4,33E-04	3
Prueba1	1,86	9,00E-04	3
Prueba2	2,06	0,0049	3
Prueba3	2,75	0,0105	3
F = 133,65			
p = 3,57E-7			

Como se puede ver en la Tabla 2, sí existe diferencia significativa ( $p \leq 0,05$ ) en la obtención de oro (Au). Al incrementar los volúmenes de adición de  $H_2O_2$ , incrementa la cantidad de Au obtenida.

A continuación, en la Tabla 4, mediante la prueba de Tukey, se puede apreciar la diferencia entre las 4 pruebas realizadas.

**Tabla 4**

*Prueba de Tukey de los g/M<sup>3</sup> de oro*

Pruebas	N	Media	Grupos Homogéneos
Control	3	1,82	X
Prueba 1	3	1,86	X
Prueba 2	3	2,05	X
Prueba 3	3	2,75	X
Contraste	Diferencia	± Límites	
Control - P1	-0,036	0,16	
Control - P2	* - 0,23	0,16	
Control - P3	* - 0,43	0,16	
P1 - P2	* -0,2	0,16	
P1 - P3	* - 0,89	0,16	
P2 - P3	* -0,69	0,16	

Nota. \*Existe diferencia significativa.

Mediante esta prueba, se puede establecer que el experimento control no presenta diferencias respecto a la prueba 1, pero sí difiere de las demás pruebas restantes. Ello indica que, al añadir un volumen medio y alto de peróxido de hidrógeno, hay diferencias significativas en la obtención de oro total. En el mayor de los casos, al adicionar 90 mL de reactivo ( $H_2O_2$  al 50 %), se logra obtener un 51 % más de oro con respecto al control.

## DISCUSIÓN

Investigaciones sobre la utilización de lixiviantes estériles han logrado obtener porcentajes de oro de 41,5 % en concentrados tostados a 700 °C (Zhang, Cui, Qiao et al., 2022). Estudios similares indican que, en minerales con ley de oro (> 4-5 g/t), la eficiencia de lixiviación mejora debido a una mayor proporción de oro libre y menor influencia proporcional de fases refractarias (Liu et al., 2022).

La adición de una baja concentración de  $H_2O_2$  no mejora directamente la velocidad de disolución del oro, pero puede actuar como oxidante adicional cuando la cantidad de

oxígeno disuelto es baja. El  $H_2O_2$  puede descomponerse en oxígeno, un proceso que puede ser catalizado por la muestra (Baharun et al., 2020).

Estudios donde incrementan la concentración de NaCN de 0,12 % a 0,18 % logran obtener pequeños incrementos en la obtención de oro (Munganyinka et al., 2022). Estudios utilizando NaCN, YX 500 y reactivo de Jinchuan (compuestos orgánicos complejantes) han logrado reducir los consumos de reactivos e incrementar la producción de oro debido a los cambios en la estructura del material y los cambios de pH por el pretratamiento (tostado) (Malyshev et al., 2025).

Según Baharun et al. (2020), la extracción de oro se ve afectada positivamente cuando se agrega  $H_2O_2$  al proceso de lixiviación con cianuro. Los autores identificaron que una concentración de 410 ppm de  $H_2O_2$  aumentó la recuperación de oro del 48,52 % al 68,85 %. Estudios de tratamiento de mineral auríferos de baja ley con  $H_2O_2$  durante la lixiviación de oro en pilas indican que la recuperación de oro aumenta de 1,2 al 55,89 % (Surimbayev et al., 2026; Yessengarayev et al., 2021).

Estudios de preoxidación de mineral mediante la adición de  $H_2O_2$  indican que existe un incremento en la concentración de oxígeno disuelto en la solución, lo cual reduce el consumo de cianuro y aumenta la concentración de oro total obtenido (Nourmohamadi & Rezai, 2022; Nunan et al., 2017). Estudios utilizando bajas concentraciones de  $H_2O_2$  indican que, debido a que este compuesto es un cianida importante, a concentraciones de 0,01 M, pH 11,5 y 25 °C no puede oxidar el cianuro. En estos casos, la velocidad de cianuración y la de extracción de Au está determinada por la concentración de cianuro (Guzman et al., 1999).

Según los estudios de Barton y Hiskey (2022), los oxidantes son más importantes que los lixiviantes en la cinética y el rendimiento de la lixiviación. Por lo tanto, el uso de  $H_2O_2$  como agente oxidante es crucial para optimizar el proceso de lixiviación y estabilidad del pH del proceso (Barton & Hiskey, 2022).

Estudios de lixiviación de minerales de baja ley de oro, utilizando peróxido de hidrógeno y nitrato de plomo, lograron obtener porcentajes de 27 % más con respecto al proceso convencional de lixiviación (Baharun et al., 2020). La adición de peróxido de hidrógeno en los procesos de lixiviación con cianuro de sodio al 2 % favorece una mayor disponibilidad de oxígeno en el sistema, lo que acelera la disolución del oro y mejora la eficiencia metalúrgica. Como resultado, se reduce el tiempo de lixiviación y se incrementa el porcentaje de recuperación de oro, optimizando el rendimiento del proceso y disminuyendo los costos operativos asociados al tiempo de tratamiento (Knorre et al., 1993).

Un análisis de varianza realizado a procesos de lixiviación donde utilizan peróxido de hidrógeno como oxidante indican que consiguieron obtener porcentajes significativos en el contenido de oro al incrementar las adiciones de concentraciones progresivas de oxidante (Layza Laban & Pretell Villalobos, 2024).

## CONCLUSIONES

Los minerales de baja ley de oro ricos en pirita y cuarzo contienen impurezas como el hierro, potasio, etcétera, los cuales reaccionan con el  $H_2O_2$  y el NaCN consumiéndolos en gran parte. Con ello, se reduce la eficiencia del proceso para la recuperación de oro. Para aumentar la eficiencia del proceso de recuperación de oro, se debe emplear compuestos con afinidad a estas impurezas.

La adición de  $H_2O_2$  en la lixiviación cianurada de minerales de baja ley de oro disminuye el consumo de NaCN porque aporta mayor concentración de oxígeno disuelto a la solución y favorece positivamente a la oxidación del oro. Por ende, permite mayor recuperación.

El consumo de NaCN disminuye significativamente al aumentar la cantidad de  $H_2O_2$  adicionada y, para mantener estable a este lixivante, se debe mantener constante el pH de trabajo para evitar la formación de gases tóxicos y pérdida de NaCN. El aumento de las cantidades de  $H_2O_2$  durante el tiempo de lixiviación incrementa la eficiencia del proceso y logra obtener mayores cantidades de oro total.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

**Washington Omar Espinoza Ramon:** escritura: borrador original. **Braulio Absalón Madrid Celi:** escritura: revisión y edición. **Gary Hitler Muñoz Bravo:** conceptualización y *software*. **Carmín Aydee de Gracia Pérez:** metodología e investigación. **Susana Elizabeth Blacio Toro:** escritura: revisión y edición.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE IA GENERATIVA

Los autores declaran que no se ha utilizado IA generativa.

## REFERENCIAS

- Baharun, N., Ling, O. P., Ardani, M. R., Ariffin, K. S., Yaraghi, A., Abdullah, N. S., Putra, T. A. R., & Ismail, S. (2020). Effect of hydrogen peroxide and lead (II) nitrate on gold cyanide leaching of Malaysian mesothermal deposit gold ore. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 56(5), 905-918. <https://doi.org/10.37190/PPMP/126629>
- Baloyi, N. P., Nheta, W., Sibanda, V., & Safari, M. (2024). Mineralogical Insights into PGM Recovery from Middle Group (1-4) Chromite Tailings. *Minerals*, 14(9), 924. <https://doi.org/10.3390/min14090924>

- Barton, I. F., & Hiskey, J. B. (2022). Chalcopryrite leaching in novel lixivians. *Hydrometallurgy*, 207, 105775. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105775>
- Buitrón, O., D., Barona, D., D., Iturra, M., F., & León, F., J. (2021). Validación del método para la determinación de oro por ensayo al fuego combinado con espectrometría de absorción atómica en muestras geológicas mineras metalúrgicas. *InfoANALÍTICA*, 9(1), 119-136. <https://doi.org/10.26807/ia.v9i1.188>
- Costa, F. R., Nery, G. P., Carneiro, C. D. C., Kahn, H., & Ulsen, C. (2022). Mineral characterization of low-grade gold ore to support geometallurgy. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2841-2852. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.085>
- Duru, N., & Nesbitt, C. (2021). Remediation of reduced sulfur species effects on gold and silver recovery during cyanide leaching. *Hydrometallurgy*, 205, 105756. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105756>
- Flores, D. J., Graber, T. A., Angel-Castillo, A. H., Hernández, P. C., & Taboada, M. E. (2025). Use of Hydrogen Peroxide as Oxidizing Agent in Chalcopryrite Leaching: A Review. *Metals*, 15(5), 531. <https://doi.org/10.3390/met15050531>
- Guzman, L., Segarra, M., Chimenos, J. M., Fernandez, M. A., & Espiell, F. (1999). Gold cyanidation using hydrogen peroxide. *Hydrometallurgy*, 52(1), 21-35. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(99\)00006-7](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(99)00006-7)
- Karppinen, A., Seisko, S., Nevatalo, L., Wilson, B. P., Yliniemi, K., & Lundström, M. (2024). Gold recovery from cyanidation residue by chloride leaching and carbon adsorption—Preliminary results from CICL process. *Hydrometallurgy*, 226, 106304. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106304>
- Kenzhaliyev, B., Surkova, T., Koizhanova, A., Yessimova, D., Amanzholova, L., & Dosymbayeva, Z. (2023). Study of the cyanide leaching of gold from low-grade raw materials in the presence of amino acids. *Inorganics*, 11(12), 461. <https://doi.org/10.3390/inorganics11120461>
- Knorre, H., Loroesch, J., Gos, S., Stoll, M., & Ziegler, A. (1993). *Process for leaching precious metals with hydrogen-peroxide and a cyande leaching solution* (Patente estadounidense n.º 5250272). Oficina de Patentes y Marcas de los Estados Unidos. <https://patents.google.com/patent/US5250272A/en>
- Layza Laban, C. N., & Pretell Villalobos, L. A. (2024). *Optimización de dosificación de peróxido de hidrógeno y cianuro en la prelixiviación de mineral sulfurado para recuperar oro y plata* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Universidad Nacional de Trujillo. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/22592>

- Liu, Z., Guo, X., Tian, Q., & Zhang, L. (2022). A systematic review of gold extraction: fundamentals, advancements, and challenges toward alternative lixiviants. *Journal of Hazardous Materials*, 440, 129778. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129778>
- Malacatus. (2023). *Estudio de impacto ambiental y plan de manejo ambiental de las concesiones mineras los ríos Uno código 300814 y los ríos Tres código 300947, para las fases de exploración y explotación bajo régimen de pequeña minería, provincias: El Oro-Azuay*. Ministerio de Ambiente de Ecuador. <https://maatecalidadambiental.ambiente.gob.ec/index.php/2026/02/05/estudio-de-impacto-ambiental-y-plan-de-manejo-ambiental-de-las-concesiones-mineras-los-rios-uno-codigo-300814-y-los-rios-tres-codigo-300947-para-las-fases-de-exploracion-y-explotacion-bajo-r/>
- Malyshev, V., Karimova, L., Sagatbek, S., Kharchenko, Y., & Magaz, A. (2025). A comparative study of gold leaching kinetics using alternative reagents from concentrates of low-grade ores. *Minerals*, 15(3), 282. <https://doi.org/10.3390/min15030282>
- Munganyinka, J. P., Habinshuti, J. B., Komadja, G. C., Uwamungu, P., Tanvar, H., Ofori-Sarpong, G., Mishra, B., Onwualu, A. P., & Shuey, S. (2022). Optimization of gold dissolution parameters in acidified thiourea leaching solution with hydrogen peroxide as an oxidant: implications of roasting pretreatment technology. *Metals*, 12(10), 1567. <https://doi.org/10.3390/met12101567>
- Nava-Alonso, F., Elorza-Rodríguez, E., Uribe-Salas, A., & Pérez-Garibay, R. (2007). Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos. *Revista de Metalurgia*, 43(1), 20-28. <https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/48/48>
- Nourmohamadi, H., & Rezai, B. (2022). Comparative study of oxidants in gold cyanidation: A molecular picture. *Minerals Engineering*, 189, 107870. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107870>
- Nunan, T. O., Viana, I. L., Peixoto, G. C., Ernesto, H., Verster, D. M., Pereira, J. H., Bonfatti, J. M., & Cesar Teixeira, L. A. (2017). Improvements in gold ore cyanidation by pre-oxidation with hydrogen peroxide. *Minerals Engineering*, 108, 67-70. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.006>
- Senanayake, G. (2006). The cyanidation of silver metal: Review of kinetics and reaction mechanism. *Hydrometallurgy*, 81(2), 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.12.001>
- Surimbayev, B., Yessengarayev, Y., Khumarbekuly, Y., Bolotova, L., Kanaly, Y., Akzharkenov, M., & Zhumabai, S. (2024). Effect of sodium acetate additive on gold leaching with cyanide solution: Laboratory and semi-pilot leaching tests. *Heliyon*, 10(15), e35805. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35805>

- Surimbayev, B., Yessengarayev, Y., Khumarbekuly, Y., Bolotova, L., Kanaly, Y., Zhumabai, S., & Akzharkenov, M. (2026). Influence of hydrogen peroxide and sodium acetate on gold cyanidation: laboratory and pilot-scale tests. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 43, 1497-1509. <https://doi.org/10.1007/s42461-025-01460-5>
- Valarezo Tenesaca, E. I., Astudillo Echeverría, J. S., Ordóñez Paladinez, V. D., Cuenca Vaca, A. B., & Leon Cueva, W. P. (2024). Reactivos usados para mejorar la lixiviación del oro con cianuro: una revisión. *Ciencia Latina. Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), 10874-10892. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i3.12248](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.12248)
- Wang, S., Gong, C., Wang, H., Xia, X., Liu, J., & Lu, H. (2025). Determination of gold content in rock gold ore samples based on closed water bath aqua regia digestion-polyurethane foam enrichment and using flame atomic absorption spectrometry. *RSC Advances*, 15(26), 20724-20733. <https://doi.org/10.1039/d5ra02280k>
- Yessengarayev, Ye. K., Surimbayev, B. N., Baimbetov, B. S., Mamyachenkov, S. V., & Kanaly, T. S. (2021). Ore treatment hydrogen peroxide during heap leaching of gold. *Complex Use of Mineral Resources*, 1(316), 5-14. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.01>
- Zhang, Y., Cui, M., Qiao, S., Liu, X., & Lyu, X. (2022). Extraction of gold from a gold concentrate using a lixiviant synthesized by a roasting process. *Hydrometallurgy*, 211, 105874. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105874>
- Zhang, Y., Cui, M., Wang, J., Liu, X., & Lyu, X. (2022). A review of gold extraction using alternatives to cyanide: focus on current status and future prospects of the novel eco-friendly synthetic gold lixiviants. *Minerals Engineering*, 176, 107336. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107336>

# PRODUCCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE CELULOSA BACTERIANA A PARTIR DE JUGO DE RAQUIS DE BANANO (*MUSA SPP.*) PRETRATADO CON OZONO MEDIANTE DISEÑO BOX-BEHNKEN

ANDRES JOEL ZEAS SESME\*

<https://orcid.org/0009-0002-0540-3434>

Facultad de Posgrado, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

THAILY JAZMIN MARTÍNEZ CASTILLO

<https://orcid.org/0000-0002-7027-6163>

Facultad de Posgrado, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

MANUEL ALEJANDRO FIALLOS CÁRDENAS

<https://orcid.org/0000-0003-3711-2041>

Facultad de Salud y Servicios Sociales, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Recibido: 13 de marzo del 2026 / Aceptado: 28 de abril del 2026

Publicado: 15 de junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8611>

**RESUMEN.** La valorización del raquis de banano (RB) constituye una estrategia clave en la bioeconomía circular de regiones tropicales. Este estudio evaluó la producción de celulosa bacteriana (CB) por *Komagataeibacter hansenii* ATCC 23769 utilizando jugo de raquis de banano (JRB) pretratado con ozono ( $600 \text{ mg O}_2 \text{ h}^{-1}$ ). Mediante un diseño Box-Behnken, se identificaron la fracción volumétrica de JRB (25-75 % v/v) y el tiempo de fermentación (7-21 días) como factores críticos del rendimiento, mientras que el tiempo de ozonización (10-30 min) mostró un efecto limitado. Bajo condiciones óptimas (75 % v/v de JRB, 21 días de fermentación), se alcanzó un rendimiento máximo de  $6,00 \pm 0,56 \text{ g L}^{-1}$ , con un modelo de superficie de respuesta de  $R^2 = 0,7894$ . El escalamiento a un biorreactor estático de

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: [azeass@unemi.edu.ec](mailto:azeass@unemi.edu.ec); [Tmartinez@unemi.edu.ec](mailto:Tmartinez@unemi.edu.ec); [manuel.fiallos@ikiam.edu.ec](mailto:manuel.fiallos@ikiam.edu.ec)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

20 L confirmó la robustez del sistema, manteniendo  $\sim 6 \text{ g L}^{-1}$ . La caracterización mediante FTIR-ATR, XRD y TGA confirmó la presencia de celulosa tipo I de alta pureza estructural. Estos resultados posicionan al JRB pretratado con ozono como un sustrato sostenible para producir CB, lo que contribuye a la valorización de residuos agroindustriales.

PALABRAS CLAVE: celulosa bacteriana / raquis de banano / ozono / optimización / superficie de respuesta / escalamiento

## PRODUCTION AND OPTIMISATION OF BACTERIAL CELLULOSE FROM BANANA (MUSA SPP.) BANANA RACHIS JUICE PRE-TREATED WITH OZONE USING A BOX-BEHNKEN DESIGN

ABSTRACT. The valorisation of banana rachis (BR) is a key strategy within the circular bioeconomy of tropical regions. This study evaluated the production of bacterial cellulose (BC) by *Komagataeibacter hansenii* ATCC 23769 using banana rachis juice (BRJ) pretreated with ozone ( $600 \text{ mg O}_2 \text{ h}^{-1}$ ). Through a Box-Behnken design, the BRJ volume fraction (25-75 % v/v) and fermentation time (7-21 days) were identified as the critical factors affecting yield, whilst ozonation time (10-30 min) exhibited a limited effect. Under optimal conditions (75 % v/v BRJ, 21 days of fermentation), a maximum yield of  $6,00 \pm 0,56 \text{ g L}^{-1}$  was achieved, with a response surface model exhibiting  $R^2 = 0,7894$ . Scale-up to a 20 L static bioreactor confirmed the robustness of the system, maintaining approximately  $6 \text{ g L}^{-1}$ . Characterisation via FTIR-ATR, XRD, and TGA confirmed type I cellulose of high structural purity. These findings position ozone-pretreated BRJ as a sustainable substrate for BC production, thereby contributing to the valorisation of agro-industrial waste.

KEYWORDS: bacterial cellulose / banana rachis / ozone / optimization / response surface / scale-up

## INTRODUCCIÓN

La agroindustria del banano (*Musa spp.*) constituye un pilar económico y social en regiones tropicales y subtropicales, especialmente en América Latina y el Caribe, donde sostiene millones de empleos rurales y representa una de las principales exportaciones agrícolas (Zou & Fan, 2022). En Ecuador, principal exportador mundial, el cultivo de banano contribuye aproximadamente con el 2 % del producto interno bruto (PIB) nacional y cerca del 35 % del PIB agrícola (Martínez-Solórzano & Rey-Brina, 2021). No obstante, la intensificación productiva ha generado externalidades ambientales significativas, incluyendo degradación del suelo, contaminación de cuerpos hídricos por agroquímicos y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), tales como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O (Abdoussalami et al., 2023).

Dentro de los desechos generados por la actividad bananera, el raquis de banano (RB) destaca como el componente lignocelulósico central encargado del soporte de los frutos durante su crecimiento. A nivel regional, este subproducto constituye aproximadamente una quinta parte de la biomasa total del vegetal, alcanzando volúmenes que sobrepasan los 1,6 millones de toneladas por año en el territorio latinoamericano (Zaini et al., 2023). El manejo inadecuado de este residuo bajo condiciones anaerobias propicia la emisión de metano, lo cual incrementa el impacto ambiental y la huella de carbono de la industria (Alzate Acevedo et al., 2021). Por consiguiente, integrar la valorización del RB en modelos de bioeconomía circular representa una oportunidad estratégica para transformar este residuo en bioproductos con alto valor comercial.

En términos de su constitución química, el RB se clasifica como una biomasa lignocelulósica integrada por celulosa (31-37 %), hemicelulosa (8-12 %) y lignina de tipo HGS (hidroxifenil-guayacil-siringil) (Deumaga et al., 2015; Tippmann et al., 2017). Esta matriz estructural se complementa con una presencia notable de fitoquímicos con actividad biológica, destacando los ácidos hidroxicinámicos (específicamente cafeico y clorogénico), además de taninos condensados y flavonoides como la quercetina y catequinas. Investigaciones recientes indican que los lixiviados derivados de este residuo pueden registrar concentraciones fenólicas totales (*total phenolic content*, TPC) de hasta 11 649,7 µg GAE mL<sup>-1</sup>, lo que demuestra propiedades antifúngicas efectivas contra patógenos como el *Colletotrichum sp.* y la *Lasiodiplodia theobromae* (Ruiz-Molina et al., 2025). Asimismo, mediante procesos de extracción optimizados con etanol al 60 % a 78 °C durante 30 minutos, se han reportado rendimientos de 796 mg GAE/100 g en peso seco (Muñoz et al., 2025). Tales características ratifican al RB como un recurso renovable con abundantes carbohidratos estructurales y moléculas bioactivas, idóneo para la síntesis de biopolímeros y diversas aplicaciones biotecnológicas de valor añadido (Fiallos-Cardenas et al., 2025; Kumari et al., 2022).

Entre los bioproductos derivados de biomasa lignocelulósica, la celulosa bacteriana (CB) destaca por su elevada pureza, biocompatibilidad, biodegradabilidad y resistencia

mecánica (Guevara et al., 2025; Minardi et al., 2024; Nanda et al., 2022). Este biopolímero es sintetizado por bacterias aerobias de los géneros *Komagataeibacter* y *Gluconacetobacter*, que producen redes fibrilares tridimensionales altamente organizadas (Bhattacharya et al., 2021). Diversos estudios han reportado que, bajo determinadas condiciones de cultivo, estas estructuras pueden presentar dimensiones a escala nanométrica; sin embargo, la confirmación de dicha morfología requiere técnicas de caracterización directa, como la microscopía electrónica (Bhattacharya et al., 2021; Ono et al., 2022; Peretz et al., 2019).

No obstante, el escalamiento industrial de la producción de CB se encuentra limitado por el elevado costo de los sustratos convencionales, como glucosa y sacarosa, los cuales pueden representar hasta el 60 % del costo total de producción (Samanta et al., 2023). En consecuencia, la identificación de fuentes alternativas de carbono, abundantes y de bajo costo, constituye un factor crítico para su viabilidad económica.

En este contexto, el jugo de raquis de banano (JRB), obtenido como subproducto líquido durante el prensado mecánico del RB, se perfila como una fuente potencial de carbono fermentable (Fiallos-Cardenas et al., 2025). Aunque su caracterización composicional específica ha sido escasamente documentada, estudios previos indican que los tejidos estructurales de la *Musa* contienen azúcares reductores en concentraciones de 8,5 a 26,6 mg g<sup>-1</sup> de peso fresco, compuestos principalmente por glucosa y fructosa, con proporciones menores de sacarosa (Jeridi et al., 2023; Pereira et al., 2016). Asimismo, los sólidos solubles totales (°Brix) en jugos de banano varían entre 1,3 y 4,0 g/100 g PF, con pH entre 5,4 y 6,0 y contenidos fenólicos que pueden alcanzar 360 mg GAE/100 g PF en determinados cultivares (Almeida et al., 2013). Esta composición sugiere que el JRB podría emplearse como medio de fermentación sostenible para la producción de CB, siempre que se optimicen sus condiciones de fermentabilidad.

Con el fin de mejorar la disponibilidad de azúcares fermentables y reducir compuestos fenólicos potencialmente inhibitorios, la ozonización se ha propuesto como un pretratamiento oxidativo ambientalmente benigno. El ozono es capaz de degradar selectivamente estructuras aromáticas, incluyendo ácidos hidroxicinámicos y flavonoides, bajo condiciones suaves de operación, lo que minimiza la formación de subproductos indeseables como furfural o 5-hidroximetilfurfural (García-Cubero et al., 2009). Aunque este tratamiento ha sido ampliamente estudiado en matrices lignocelulósicas sólidas, su aplicación directa en matrices líquidas complejas como el JRB permanece escasamente explorada. Estudios preliminares sugieren que la exposición controlada al ozono puede disminuir el contenido fenólico y mejorar la calidad del medio fermentativo, lo que favorece el crecimiento microbiano (Arias-Roblero et al., 2021). No obstante, exposiciones prolongadas pueden inducir estrés metabólico por acumulación de especies reactivas de oxígeno, lo que afecta la viabilidad celular y limita la síntesis de celulosa (Ono et al., 2022; Peretz et al., 2019).

Debido a que la obtención de CB está condicionada por la interacción de diversos factores, tales como el tiempo de fermentación, la dosificación de ozono y la fracción volumétrica de JRB, el bioproceso manifiesta una naturaleza no lineal que exige el empleo de métodos estadísticos avanzados para su ajuste óptimo. En este sentido, el diseño Box-Behnken (BBD), en conjunto con la metodología de superficie de respuesta (MSR), constituye una herramienta eficaz para examinar no solo los efectos lineales y cuadráticos, sino también las interacciones entre las variables independientes. Esta aproximación permite maximizar el rendimiento en sistemas biotecnológicos de alta complejidad mediante la ejecución de un número optimizado de ensayos experimentales.

Bajo este panorama, la presente investigación se centró en el desarrollo y la optimización de la síntesis de celulosa bacteriana empleando JRB sometido a ozonización, aplicando para ello un diseño experimental Box-Behnken integrado a un modelo de superficie de respuesta. De igual manera, se procedió con la caracterización estructural y fisicoquímica del biopolímero resultante mediante técnicas de difracción de rayos X (XRD), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y análisis termogravimétrico (TGA), con el propósito de ratificar la identidad celulósica de las fibras y examinar su estabilidad estructural. El flujo de trabajo incluyó además la validación del sistema optimizado a escala piloto en un biorreactor estático con capacidad de 20 L. En esta fase, se analizó el desempeño operativo bajo parámetros ampliados, priorizando el estudio de la autorregulación del pH y la influencia de la relación entre el área superficial y el volumen. Aunque el alcance de este trabajo no contempló el análisis morfológico por microscopía electrónica, los datos químicos y estructurales obtenidos son suficientes para confirmar la naturaleza del material. Esta metodología combina el aprovechamiento de subproductos agrícolas con herramientas estadísticas y análisis avanzado, lo que establece una ruta sostenible alineada con los principios de la bioeconomía circular en contextos agroindustriales tropicales.

## METODOLOGÍA

El estudio se estructuró en dos fases principales: la optimización de las condiciones de producción de CB mediante un diseño Box-Behnken (DBB), integrado en un modelo de superficie de respuesta (MSR), y la validación y el escalado del proceso utilizando análisis FTIR para corroborar la consistencia estructural del biopolímero obtenido bajo las condiciones óptimas.

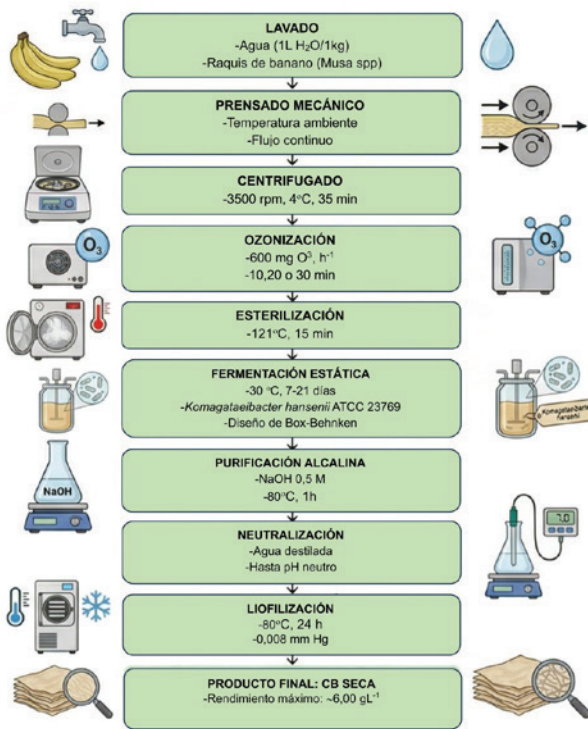
### Materias primas y preparación del JRB

El raquis de banano (*Musa acuminata*, subgrupo *Cavendish*) se recolectó en una plantación orgánica ubicada en Tres Postes, provincia del Guayas, Ecuador (-1,9837, -79,6114). Se seleccionaron treinta unidades libres de daño mecánico o signos de necrosis, con un peso promedio de  $2,0 \pm 0,5$  kg y una longitud aproximada de 50-70 cm.

La biomasa se lavó con agua corriente y esponjas suaves para eliminar residuos de látex. Posteriormente, para la extracción del jugo, el raquis se seccionó transversalmente y se procesó a temperatura ambiente en un molino de tres rodillos Fairuz eléctrico de 110 voltios (Ecuador), con un motor de 1 HP. Este procedimiento consistió en un prensado mecánico continuo que permitió exprimir y separar el exudado líquido de la matriz fibrosa sólida, adaptando la metodología descrita por Fiallos-Cárdenas et al. (2022). El flujo detallado de esta extracción y del bioproceso general se ilustra en la Figura 1.

Figura 1

Diagrama de flujo del bioproceso



Para la eliminación de partículas suspendidas, el JRB recolectado se centrifugó a 3500 rpm durante 35 minutos a una temperatura de 4 °C, empleando una unidad Thermo Scientific Sorvall ST 16R. El líquido resultante se sometió a esterilización en autoclave (Yamato Serie SM, Japón) bajo condiciones de 121 °C por 15 minutos. Finalmente, con el propósito de mitigar la fotodegradación de los elementos bioactivos, el sustrato estéril se resguardó en envases de vidrio ámbar a 4 °C dentro de un refrigerador especializado Infrico (modelo AGB 701 CR) (Pacheco et al., 2018).

### Formulación del medio y del inóculo

Se preparó una infusión de té verde ( $10 \text{ g L}^{-1}$ ) suplementada con azúcar moreno ( $83,3 \text{ g L}^{-1}$ ) y vinagre blanco ( $100 \text{ g L}^{-1}$ ). Posteriormente, el medio de cultivo se esterilizó a  $121 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 15 minutos, dejándose enfriar bajo condiciones estériles para evitar contaminación.

Las unidades experimentales consistieron en frascos de 250 mL con 100 mL de volumen de trabajo. Cada sistema fue inoculado con 10 % v/v (10 mL) de una suspensión activa de *Komagataeibacter hansenii* ATCC 23769. La cepa se cultivó previamente en medio Hestrin-Schramm (HS) a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 48 horas bajo condiciones estáticas hasta alcanzar fase exponencial.

### Pretratamiento con ozono

El JRB se sometió a ozonización en un sistema cerrado con tapa de aluminio utilizando un generador GL-3189 ( $600 \text{ mg O}_2 \text{ h}^{-1}$ , China). El ozono gaseoso se burbujeó en 1 L de JRB mediante un difusor de piedra porosa durante 10, 20 o 30 minutos, manteniendo una temperatura de  $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  y presión atmosférica (1,02 atm).

La concentración de ozono disuelto se determinó mediante el método yodométrico descrito en el estándar APHA 4500- $\text{O}_2$  B. Tras el tratamiento, el JRB se aireó en condiciones estériles durante 5 minutos para eliminar el ozono residual y, posteriormente, se almacenó a  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta su uso (Al-Baarri et al., 2019).

### Caracterización fisicoquímica del JRB y cuantificación de $\text{CO}_2$

Las propiedades fisicoquímicas del JRB se determinaron utilizando un equipo multiparámetro portátil (Hanna Instruments HI9829-02), siguiendo procedimientos estandarizados descritos en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Viri, 2025). Se midieron el pH, el oxígeno disuelto (OD), la salinidad, los sólidos disueltos totales (SDT), la conductividad eléctrica y la resistividad. El pH fue verificado, adicionalmente, mediante un potenciómetro digital (APERA Instruments PC60), previamente calibrado con soluciones *buffer* certificadas a pH 4,00 y 7,00, a temperatura ambiente ( $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Para determinar la concentración de azúcares reductores, se empleó la técnica colorimétrica del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), basada en el protocolo de Miller (1959), con ligeros ajustes. El procedimiento consistió en combinar volúmenes iguales (1 mL) de muestra y reactivo DNS, sometiendo la mezcla a un baño maría a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  por un periodo de 5 minutos. Tras alcanzar la temperatura ambiente, las soluciones se diluyeron con 8 mL de agua destilada. La lectura de absorbancia se efectuó a 540 nm mediante un espectrofotómetro UV-Vis Thermo Scientific Genesys 10S, utilizando celdas de cuarzo. Finalmente, los valores se convirtieron a unidades de  $\text{g L}^{-1}$  empleando una curva de calibración de glucosa ( $0^{-1} \text{ g L}^{-1}$ ) (Burgos Montañez, 2020).

La producción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se determinó por el método gravimétrico directo descrito por Irving et al. (2024), registrando la masa inicial ( $m_i$ ) y la final ( $m_f$ ) del sistema cerrado. La masa de CO<sub>2</sub> generada se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$m_{\text{CO}_2} = m_i - m_f,$$

donde  $m_{\text{CO}_2}$  representa la masa total de dióxido de carbono liberada durante la fermentación.

### Producción y optimización de CB mediante diseño Box-Behnken

Con el objetivo de optimizar la obtención de CB, se implementó un diseño experimental Box-Behnken estructurado en tres niveles y tres factores, lo que derivó en la ejecución de un total de quince ensayos o corridas experimentales. Los factores evaluados fueron:

$X_1$ : tiempo de ozonización (10, 20 y 30 minutos)

$X_2$ : fracción de JRB (25, 50 y 75 % v/v)

$X_3$ : tiempo de fermentación (7, 14 y 21 días)

El punto central del diseño se estableció en 20 minutos de ozonización, 50 % v/v de JRB y 14 días de fermentación. Luego, las fermentaciones se realizaron en condiciones estáticas a  $30 \pm 1$  °C y 70-80 % de humedad relativa. Todas las corridas se realizaron por triplicado.

Una vez concluidos los periodos de fermentación, se procedió a la recolección de las membranas de CB para su posterior purificación, la cual consistió en un tratamiento alcalino con NaOH 0,5 M a una temperatura de 80 °C por un lapso de una hora. El proceso de limpieza continuó con lavados sucesivos empleando agua destilada hasta verificar un pH neutro en el material. Finalmente, el biopolímero se sometió a una fase de liofilización bajo condiciones controladas (-80 °C, 0,008 mm Hg, 24 horas) durante 24 horas, utilizando para este fin un equipo Biosafer-10D (Pineda et al., 2012).

El rendimiento de la CB ( $Y$ , g L<sup>-1</sup>) se calculó mediante:

$$Y = \frac{W_d}{V},$$

donde  $W_d$  representa la masa seca de CB obtenida; y  $V$ , el volumen de reacción (0,1 L).

Se procedió con el ajuste de los valores obtenidos experimentalmente mediante una ecuación polinómica de segundo grado, empleando un modelo cuadrático para describir el sistema:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \varepsilon,$$

donde  $\beta_0$  es el término independiente;  $\beta_i$ , los coeficientes lineales;  $\beta_{ij}$ , los coeficientes de interacción;  $\beta_{ii}$ , los términos cuadráticos; y  $\epsilon$ , el error experimental.

La significancia del modelo se evaluó mediante análisis de varianza (ANOVA), incluyendo pruebas de falta de ajuste. Se calcularon el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ), el error cuadrático medio (RMSE) y se generaron superficies de respuesta.

La validación de la condición óptima se realizó comparando el rendimiento experimental obtenido bajo las condiciones predichas por el modelo con el valor teórico estimado, calculando el error relativo porcentual.

El análisis estadístico se efectuó en RStudio (v2025.05.1+513) utilizando los paquetes tidyverse, multcomp y corrplot.

## Escalamiento y caracterización estructural

### *Escalamiento del proceso*

El proceso optimizado se escaló a un biorreactor estático de 20 L manteniendo similitud operativa con las condiciones de laboratorio. Se aplicaron las condiciones óptimas determinadas por el modelo MSR: 20 min de ozonización, 75 % v/v de JRB y 21 días de fermentación.

El medio se preparó manteniendo las mismas proporciones utilizadas a escala laboratorio: infusión de té verde (10 g L<sup>-1</sup>), azúcar moreno (83,3 g L<sup>-1</sup>), vinagre blanco (100 g L<sup>-1</sup>) y 10 % v/v de inóculo.

El sistema operó sin aireación forzada ni control automático de pH, manteniendo una temperatura constante de 30 ± 1 °C. Los parámetros fisicoquímicos se monitorearon cada 48 horas para evaluar la estabilidad y reproducibilidad del proceso.

### *Análisis mediante espectroscopía infrarroja (FTIR-ATR)*

La recolección de los espectros FTIR-ATR se realizó utilizando un espectrómetro Spectrum GX (PerkinElmer, Estados Unidos), cubriendo una región de barrido de 4000-500 cm<sup>-1</sup>, con una resolución de 4 cm<sup>-1</sup> y un total de 32 escaneos por muestra. El procedimiento consistió en colocar las láminas secas de CB en contacto directo con el cristal de diamante del accesorio ATR, realizando los ajustes pertinentes de línea base y correcciones de fondo. Finalmente, los datos obtenidos del análisis espectral fueron procesados mediante el software OriginPro 9.0 (Xu et al., 2020).

### *X-ray Diffraction (XRD)*

Para el estudio de las propiedades cristalográficas, se empleó radiación Cu K $\alpha_1$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) mediante un difractómetro configurado con haz paralelo. El equipo operó bajo parámetros de 45 kV y 200 mA utilizando un sistema de rendijas que incluyó una incidente de 0,2 mm,

una limitadora de longitud de 10 mm y un analizador de 0,5°. Esta metodología se basó en el procedimiento detallado por Fiallos-Cárdenas et al. (2021). Adicionalmente, la determinación del índice de cristalinidad (CrI) se realizó siguiendo el protocolo de Segal et al. (1959), aplicando la siguiente relación matemática. Antes, cabe resaltar que, para la determinación del grado de orden molecular, se aplicó el cálculo del índice de cristalinidad (CrI) fundamentado en la metodología de Segal:

$$CrI = \frac{(I_{200} - I_{am})}{I_{200}} \times 100,$$

donde  $I_{200}$  corresponde a la intensidad máxima del plano cristalino (200) y  $I_{am}$  a la intensidad del fondo amorfo.

#### *Análisis termogravimétrico (TGA)*

El comportamiento térmico de las muestras de CB liofilizadas se evaluó mediante un analizador termogravimétrico simultáneo (SDT Q600, TA Instruments, Estados Unidos). Muestras de aproximadamente 5-10 mg se colocaron en crisoles de alúmina y se sometieron a un programa de calentamiento desde temperatura ambiente hasta 800 °C, con una rampa de calentamiento de 10 °C min<sup>-1</sup>, bajo atmósfera inerte de nitrógeno con un flujo de 100 mL min<sup>-1</sup>. Se registraron simultáneamente las curvas de pérdida de masa (TGA). La temperatura de degradación máxima se determinó a partir de la derivada de la curva TGA (DTG). Este análisis permitió identificar las etapas de descomposición térmica, la pureza del material y la presencia de residuos carbonosos, siguiendo protocolos establecidos para celulosa bacteriana derivada de residuos agroindustriales (Nascimento et al., 2023).

El perfil térmico de las membranas de CB liofilizadas se analizó empleando un equipo de termogravimetría simultánea SDT Q600 (TA Instruments, Estados Unidos). El procedimiento consistió en depositar cantidades de entre 5 y 10 mg de muestra en crisoles de alúmina, iniciando un ciclo de calentamiento desde la temperatura ambiente hasta los 800 °C. Se aplicó una rampa de incremento térmico de 10 °C min<sup>-1</sup>, bajo un flujo constante de nitrógeno (100 mL min<sup>-1</sup>) para garantizar una atmósfera inerte. Durante el ensayo, se obtuvieron de forma simultánea las curvas de pérdida de masa (TGA), mientras que el punto de máxima degradación se calculó a partir de la derivada de dicha curva (DTG). Esta metodología facilitó la identificación de las fases de descomposición, el nivel de pureza del biopolímero y la cuantificación de residuos de carbono, siguiendo los estándares para CB de origen agroindustrial propuestos por Nascimento et al. (2023).

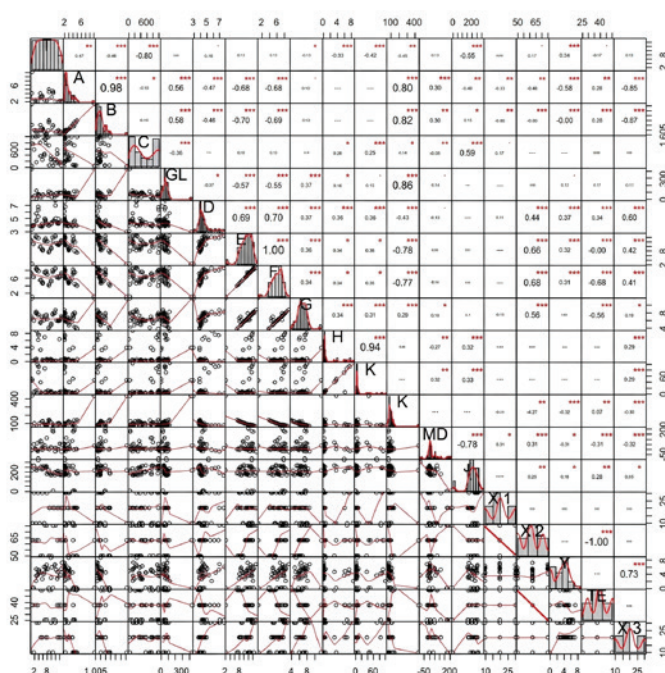
## RESULTADOS

### Análisis correlacional y relaciones entre parámetros fisicoquímicos

El análisis de correlaciones de Pearson (Figura 2) reveló interacciones complejas entre las variables fisicoquímicas durante la fermentación. Los parámetros °Brix, gravedad específica, turbidez, pH, conductividad y resistividad emergieron como los más influyentes, mientras que salinidad, glucosa, sólidos disueltos totales, tiempo de ozonización, masa de CO<sub>2</sub> y rendimiento de CB mostraron roles secundarios. Se observó una fuerte correlación entre °Brix y gravedad específica ( $r = 0,98$ ), validando el uso de °Brix como indicador indirecto de densidad del medio, aunque su correlación con glucosa y sólidos disueltos fue débil (Bonifazi et al., 2023).

Figura 2

Correlograma de Pearson que representa las correlaciones entre variables fisicoquímicas



Nota. Correlograma de Pearson. Diagonal: histogramas y densidad; inferior: diagramas de dispersión; superior: coeficientes r con niveles de significancia (\* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$ ).

Se identificaron interacciones críticas; por ejemplo, una correlación positiva moderada entre el tiempo de ozonización ( $X_1$ ) y la turbidez ( $r = 0,52$ ;  $p < 0,05$ ) sugiere que tratamientos prolongados incrementan la dispersión coloidal de componentes del raquis. Asimismo,

la masa de CO<sub>2</sub> (mCO<sub>2</sub>) actuó como un indicador indirecto de la actividad metabólica de *K. hansenii*, correlacionándose positivamente con el consumo de glucosa.

Los medios más densos y ricos en azúcares se asociaron con pH más bajo y menor conductividad, pero mayor resistividad, lo que refleja la acumulación de ácidos orgánicos durante la fermentación (Choudhary et al., 2024). La turbidez aumentó en medios menos ácidos y con mayor contenido iónico, y se incrementó con tiempos prolongados de ozonización, lo que favorece la dispersión coloidal y lo que podría afectar la viabilidad microbiana (Jahed et al., 2014). La masa de CO<sub>2</sub> se correlacionó con el consumo de glucosa, mientras que el rendimiento de CB dependió de la disponibilidad de glucosa y oxígeno, lo que confirma que condiciones aeróbicas y sustratos ricos en carbono favorecen la formación de biopelículas (Mulyono et al., 2024). Los coeficientes del modelo cuadrático ajustado que describen cuantitativamente el impacto de estos factores en el rendimiento de CB se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Coefficientes estimados del modelo cuadrático ajustado mediante diseño DBB para la predicción del rendimiento de CB (PM)*

Parámetro	Coefficiente	Error estándar	t-value	p-valor	Significancia
Intercepto	12,87	6,15	2,09	0,03	*
TO (X <sub>1</sub> )	-0,07	0,13	-0,58	0,55	n.s.
VOL (X <sub>2</sub> )	-0,68	0,17	-3,98	0,0001	***
TF (X <sub>3</sub> )	1,024	0,13	7,39	1,79e-11	***
TO-VOL (X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> )	0,0020	0,0015	1,33	0,18	n.s.
TO-TF (X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> )	0,0017	0,0019	0,90	0,36	n.s.
VOL-TF (X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> )	0,0010	0,0016	0,60	0,54	n.s.
TO <sup>2</sup> (X <sub>1</sub> <sup>2</sup> )	-0,0019	0,0021	-0,93	0,35	n.s.
VOL <sup>2</sup> (X <sub>2</sub> <sup>2</sup> )	0,0052	0,0013	3,99	0,0001	***
TF <sup>2</sup> (X <sub>3</sub> <sup>2</sup> )	-0,0218	0,0020	-10,66	<0,0001	***

*Nota.* Los coeficientes estimados corresponden a un modelo de regresión cuadrática de superficie de respuesta. Se reportan los errores estándar, valores t y niveles de probabilidad (p-valor). Los símbolos de significancia indican: \*\*\*  $p < 0,001$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*  $p < 0,05$  y n.s. (no significativo)  $p \geq 0,05$ .

### Rendimiento de CB y validación del modelo

En la Tabla 2, se muestra la matriz experimental del diseño Box-Behnken con los rendimientos de CB obtenidos (expresados en g L<sup>-1</sup> de medio) y los valores predichos por el modelo.

**Tabla 2**

Diseño experimental utilizando el Box-Behnken

N.º	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Y(g/L)	
				2(DBB)	1(Experimental)
1	-1	-1	0	4,81	4,70±0,10
2	1	-1	0	4,46	3,90±1,04
3	-1	1	0	5,03	5,90±0,96
4	1	1	0	5,93	5,70±0,62
5	-1	0	-1	0,00	0,00±0,00
6	1	0	-1	0,00	0,00±0,00
7	-1	0	1	4,21	3,40±1,47
8	1	0	1	4,71	4,44±0,73
9	0	-1	-1	0,31	0,00±0,00
10	0	1	-1	0,79	0,00±0,00
11	0	-1	1	4,99	5,80±2,51
12	0	1	1	5,95	6,00±0,56
13	0	0	0	4,37	3,00±0,90
14	0	0	0	4,37	4,80±0,72
15	0	0	0	4,37	5,70±1,69

Nota. Los ensayos 13, 14 y 15 corresponden a los puntos centrales del diseño, establecidos en 20 minutos de ozonización ( $X_1$ ), 50 % v/v de fracción de JRB ( $X_2$ ) y 14 días de fermentación ( $X_3$ ). Estos puntos permitieron una estimación precisa del error puro del modelo.

Los resultados experimentales mostraron que fermentaciones de 7 días ( $X_3 = -1$ ) no produjeron CB detectable, lo que indicó que este periodo es insuficiente para el crecimiento logarítmico de *K. hansenii* y la formación del polímero. Los mayores rendimientos se alcanzaron a los 21 días de fermentación ( $X_3 = 1$ ), destacando los ensayos 11 ( $5,80 \pm 2,51 \text{ g L}^{-1}$ ) y 12 ( $6,00 \pm 0,56 \text{ g L}^{-1}$ ). Este último corresponde a la condición con mayor fracción de JRB (75% v/v) y tiempo de ozonización intermedio (20 minutos).

Se observó que una mayor fracción de JRB ( $X_2 = 75 \%$  v/v, equivalente a 75 mL en 100 mL de medio) favoreció la producción de CB en comparación con fracciones menores, como se ejemplifica al comparar el ensayo 3 ( $5,90 \pm 0,96 \text{ g L}^{-1}$ ) con el ensayo 1 ( $4,70 \pm 0,10 \text{ g L}^{-1}$ ), ambos con 14 días de fermentación. Esto respalda la importancia de la relación superficie/volumen y la disponibilidad de sustrato en fermentaciones estáticas (Lima et al., 2017).

Respecto a la variable del tiempo de ozonización ( $X_1$ ), aunque no mostró una significancia estadística determinante, se identificó un comportamiento de naturaleza no lineal. Específicamente, el tratamiento de 20 minutos exhibió una mayor eficacia en comparación con el de 30 minutos al interactuar con concentraciones elevadas de JRB. Se

observó que una exposición prolongada al ozono (30 minutos) derivó en un incremento de la turbidez en el medio de cultivo, como se evidencia en el ensayo 8 ( $4,44 \pm 0,73 \text{ g L}^{-1}$ ), lo cual sugiere una posible liberación de sustancias coloidales. No obstante, este fenómeno también podría estar asociado con la inducción de estrés metabólico provocado por la acumulación de especies reactivas de oxígeno, un factor que restringe la biosíntesis del polímero.

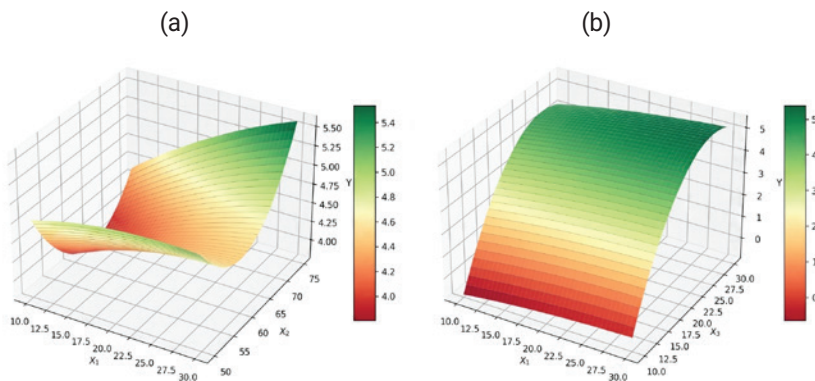
La capacidad predictiva del modelo MSR demostró una alta fidelidad respecto a los datos experimentales, lo que ha registrado márgenes de error relativo próximos al 2 % en aquellos escenarios con síntesis efectiva de polímero. De igual manera, el modelo estimó con acierto la nula obtención de biomasa en los periodos de fermentación de 7 días, lo que validó su robustez para identificar los límites operativos del sistema.

### Ajuste del modelo estadístico mediante MSR

Mediante la implementación del BBD fue posible establecer un modelo matemático que describe la síntesis de CB en función de las variables evaluadas. El modelo cuadrático presentó un  $R^2 = 0,7894$ , considerado aceptable dada la complejidad y heterogeneidad del sustrato agroindustrial. Las variaciones observadas en la variable de respuesta (Tabla 2), que en algunos casos superan el 40 % (especialmente en el punto central), se atribuyen a la sensibilidad del microorganismo ante la variabilidad nutricional del sustrato orgánico y posibles efectos del estrés oxidativo residual (Saleh et al., 2021).

### Figura 3

Superficies de respuesta del modelo MSR para la producción de CB



Nota. Gráficas de superficie de respuesta para la variable Y en función de las interacciones entre los factores analizados. (a) Interacción  $X_1$  vs.  $X_2$ ; (b) Interacción  $X_1$  vs.  $X_3$ . Las gradientes de color indican las zonas de optimización (verde para valores máximos y rojo para mínimos), lo que evidencia la curvatura significativa de los efectos cuadráticos en el sistema.

Las superficies de respuesta (Figura 3) confirmaron los hallazgos del modelo: el rendimiento mostró una variación mínima frente a  $X_1$  (tiempo de ozonización), mientras que los incrementos en  $X_2$  (fracción de JRB) y  $X_3$  (tiempo de fermentación) promovieron rendimientos máximos, con un óptimo en el límite superior del rango evaluado (21 días). Estos resultados coinciden con estudios previos que destacan el tiempo de fermentación y la disponibilidad de sustrato como impulsores clave en la síntesis de biopolímeros, mientras que factores como el tiempo de oxidación presentan un impacto menor o no significativo (Wang et al., 2017).

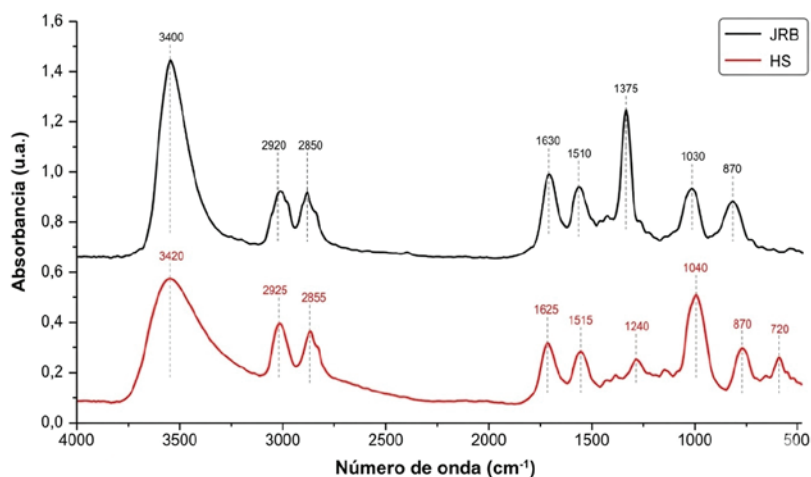
## Caracterización estructural por FTIR-ATR, XRD y TGA

### Caracterización estructural, térmica y mecánica

La espectroscopía FTIR confirmó la integridad estructural y la pureza de la CB obtenida a partir de JRB pretratado con ozono. Esto evidenció, en la Figura 4, bandas características de celulosa tipo I comparables con las de una muestra estándar cultivada en medio Hestrin-Schramm (HS). En particular, la banda ancha alrededor de  $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$  en la muestra JRB indica una mayor densidad de grupos hidroxilo (-OH), lo que sugiere una funcionalización superficial superior (Figura 4). Asimismo, las bandas en el intervalo de  $2893\text{-}2854\text{ cm}^{-1}$  corroboran su naturaleza polisacáridica y reflejan la influencia del sustrato sobre la organización molecular.

### Figura 4

FTIR comparativo de JRB y muestra estándar cultivada HS



Nota. El espectro FTIR compara la celulosa bacteriana obtenida de JRB (negro) y la muestra estándar HS (rojo). Se indican las principales bandas características de celulosa tipo I, con sus respectivos números de onda asignados a los grupos funcionales más relevantes.

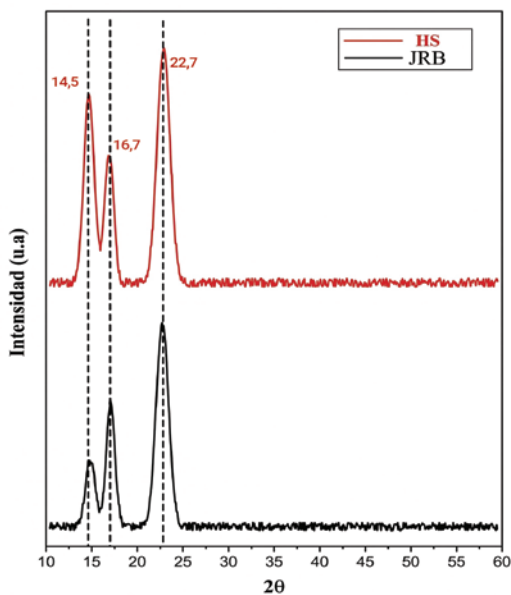
Las señales detectadas en el rango de  $1625\text{-}1630\text{ cm}^{-1}$  se vinculan primordialmente con las vibraciones de deformación del agua adsorbida en la matriz, pudiendo incluir aportes de grupos carbonilo. Por otro lado, las bandas localizadas entre  $1160\text{-}1030\text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a las vibraciones de los enlaces C–O–C y C–O, las cuales son distintivas de los polisacáridos. Esto ratifica la preservación de la arquitectura molecular basada en enlaces  $\beta\text{-}1,4\text{-glucosídicos}$  (Syafri et al., 2022). De manera integral, estos hallazgos demuestran que, aun con las variaciones superficiales derivadas del uso de JRB y la ozonización, la CB sintetizada conserva una integridad estructural análoga a la obtenida en sustratos tradicionales, lo que consolida su viabilidad para aplicaciones en los sectores biotecnológico y biomédico.

### Difracción de rayos X

La caracterización estructural se complementó mediante el análisis por difracción de rayos X (XRD), cuyos resultados se presentan en la Figura 5. Los perfiles de difracción obtenidos para ambas muestras exhibieron las señales distintivas de la celulosa tipo I. Específicamente, se identificaron máximos de intensidad en ángulos  $2\theta \approx 14,5^\circ$ ,  $16,8^\circ$  y  $22,7^\circ$ , los cuales se asocian a los planos cristalográficos  $(\bar{1}\bar{1}0)$ ,  $(110)$  y  $(200)$ , respectivamente.

Figura 5

Difractogramas de rayos X de CB producida en JRB y en medio HS



Nota. Diffractogramas XRD de celulosa bacteriana (JRB vs HS). Las señales marcadas corresponden a reflexiones típicas de la estructura cristalina de celulosa tipo I.

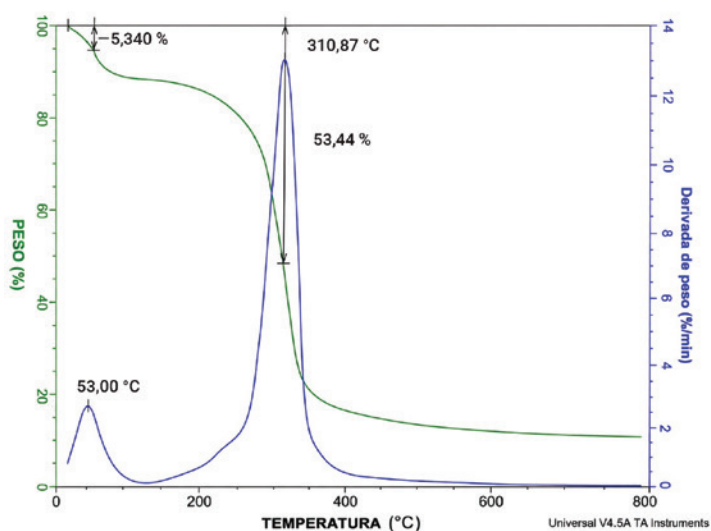
El índice de cristalinidad (CrI), calculado según el método de Segal et al. (1959), fue de 67,9 % para la muestra producida en JRB, valor inferior al 81,6 % determinado para la muestra cultivada en medio HS. Esta reducción en la cristalinidad sugiere que la complejidad del sustrato JRB y el pretratamiento con ozono pueden influir en la organización molecular del polímero, aunque sin comprometer su estructura fundamental de celulosa tipo I. Estos resultados indican que, a pesar de las modificaciones superficiales inducidas, la CB obtenida mantiene propiedades estructurales adecuadas para potenciales aplicaciones biomédicas y biotecnológicas.

### Análisis termogravimétrico (TGA/DTG)

A través del análisis termogravimétrico (TGA) y su correspondiente derivada (DTG), se evaluó el comportamiento de la muestra T8-CB (con una masa inicial de 8,2920 mg empleando el sistema SDT Q600). Como se observa en la Figura 6, los resultados obtenidos muestran un perfil de degradación térmica propio de una CB con un elevado grado de pureza. Este registro permite confirmar la estabilidad del polímero frente a incrementos de temperatura, lo que valida la eficacia del proceso de síntesis.

**Figura 6**

*Curvas termogravimétricas y termogravimétrica derivada de la CB obtenida en condiciones óptimas*



*Nota.* Curvas obtenidas por termogravimetría (TGA, en verde) y su primera derivada (DTG, en azul) de una muestra de celulosa bacteriana (T8-CB)

El análisis TGA evidencia tres etapas de descomposición térmica bien definidas para la muestra obtenida. La primera, situada entre 50-150 °C, corresponde a la pérdida de agua adsorbida y ligada a los grupos hidroxilo de la celulosa, lo que representan un 5,34 % de la masa inicial (Barbadillo Jove, 2015). Esta deshidratación inicial, que se manifiesta con un pico de máxima velocidad de pérdida de peso en la curva DTG a 53 °C, es indicativa de una alta capacidad de retención de agua, propiedad intrínseca de la estructura fibrilar y la elevada área superficial de la celulosa bacteriana (Abdel Hakim & Mourad, 2023).

La segunda etapa presenta un pico máximo de degradación en la derivada del peso (DTG) a 310,87 °C, lo cual representa la descomposición térmica principal del polímero. Este fenómeno se atribuye a la despolimerización de las cadenas mediante la ruptura de los enlaces glucosídicos  $\beta$ -1,4 y la consecuente formación de compuestos volátiles como el levoglucosano (Borsoi et al., 2016). Esta etapa concentra la mayor pérdida de masa del material (53,44 %), un valor consistente con la estabilidad térmica reportada para celulosa bacteriana purificada y sintetizada a partir de residuos del género *Musa* (Valenzuela-Cobos et al., 2024). Notablemente, la ausencia de eventos de degradación significativos en el rango de 200-250 °C sugiere la eliminación efectiva de componentes no celulósicos como hemicelulosa y lignina mediante el pretratamiento con ozono, lo que confirma la pureza del material obtenido (Tamo et al., 2025).

Por último, por encima de 350 °C se observa la formación de un residuo carbonoso final inferior al 15 % a 800 °C, lo que refuerza la naturaleza orgánica y la homogeneidad de la muestra (Huang et al., 2016; Zahan et al., 2015).

En conjunto, los resultados de FTIR, XRD y TGA confirman de manera consistente la naturaleza celulósica del material obtenido y evidencian que el pretratamiento aplicado no altera su comportamiento térmico característico. No obstante, debido a la ausencia de caracterización morfológica mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), no es posible determinar el diámetro de las fibras ni confirmar de manera concluyente su escala nanométrica (Bhattacharya et al., 2021). Por lo tanto, aunque las propiedades químicas y térmicas son compatibles con la celulosa, esta clasificación no puede establecerse únicamente con las técnicas empleadas en este estudio.

## DISCUSIÓN

La producción de CB a partir de JRB pretratado con ozono demostró ser una alternativa viable, pues alcanzó rendimientos máximos de  $6,00 \pm 0,56 \text{ g L}^{-1}$ . Estos valores superan lo reportado para diversos sustratos agroindustriales bajo condiciones estáticas, como el jugo de sisal (Lima et al., 2017) y los extractos foliares de banano (Fiallos-Cárdenas et al., 2021). Este incremento en el rendimiento puede atribuirse principalmente a la optimización de la fracción volumétrica del sustrato y del tiempo de fermentación, variables identificadas como significativas por el modelo de superficie de respuesta (Wang et al., 2017).

El efecto del pretratamiento con ozono sobre la producción de CB fue limitado, con una tendencia no lineal. Aunque tiempos intermedios de ozonización (20 minutos) se asociaron con mayores rendimientos, el análisis estadístico indicó que este factor no fue significativo ( $p > 0,05$ ). Además, exposiciones prolongadas (30 minutos) se asociaron con una reducción en la producción, lo que sugiere que la generación de especies reactivas de oxígeno podría inducir estrés oxidativo en *K. hansenii*, lo que afectaría su actividad metabólica. Este comportamiento coincide con lo reportado en la literatura, donde el ozono puede ejercer efectos duales dependiendo de la dosis y el tiempo de exposición (Ono et al., 2022; Peretz et al., 2019).

En cuanto a la caracterización estructural, los análisis FTIR y XRD confirmaron la presencia de celulosa tipo I con alta pureza, evidenciada por la ausencia de señales atribuibles a lignina o hemicelulosa. Los análisis TGA mostraron un perfil térmico característico de la CB, con una pérdida principal de masa alrededor de 310 °C y ausencia de eventos térmicos en el rango de 200-250 °C, lo que refuerza la pureza del material. Cabe señalar que estos resultados no permiten atribuir de manera directa este nivel de pureza al pretratamiento con ozono, ya que la fermentación bacteriana por sí misma puede generar celulosa altamente pura.

Aunque en este estudio no se realizó caracterización morfológica mediante microscopía electrónica (SEM o TEM), diversos estudios han reportado que cepas del género *Komagataeibacter* producen redes de celulosa con diámetros en el rango nanométrico (Bhattacharya et al., 2021; Ono et al., 2022). No obstante, se recomienda que futuros estudios confirmen directamente la morfología del material obtenido a partir de JRB. En este sentido, los resultados obtenidos sugieren que el medio basado en JRB permite la formación de la estructura  $\beta$ -1,4-glucosídica característica, aunque con una ligera reducción en la cristalinidad (67,9 %) respecto del medio estándar Hestrin-Schramm (81,6 %). Esta diferencia podría estar relacionada con la complejidad del sustrato más que con el efecto del ozono.

Desde una perspectiva funcional, la menor cristalinidad observada (67,9 %), en comparación con el medio estándar HS (81,6 %), sugiere una posible mayor flexibilidad y capacidad de retención de agua, propiedades que podrían ser favorables en aplicaciones biomédicas como apósitos o hidrogeles. No obstante, esta hipótesis requiere una validación experimental mediante ensayos mecánicos y de absorción.

El escalamiento del proceso a un biorreactor estático de 20 L confirmó la viabilidad del sistema bajo condiciones controladas. En estos sistemas, la relación entre el área superficial y el volumen, así como la disponibilidad de oxígeno, son factores críticos. En este estudio, la estabilidad del pH y la temperatura (30 °C) contribuyeron a evitar la acidificación excesiva del medio, un fenómeno común en fermentaciones con sustratos ricos en azúcares (Minardi et al., 2024).

En conclusión, los hallazgos de esta investigación consolidan al JRB como un recurso con alto potencial biotecnológico bajo un modelo de bioeconomía circular. En Ecuador, donde la industria del banano produce cantidades masivas de subproductos, la transformación de estos desechos mediante técnicas biotecnológicas representa una vía efectiva para mitigar el deterioro ambiental y fomentar la producción de materiales biológicos con alto valor comercial (Alzate Acevedo et al., 2021).

## CONCLUSIÓN

Los resultados de esta investigación ratifican al JRB como una materia prima sostenible y técnicamente viable para la obtención de CB, posicionándose como una solución estratégica para el aprovechamiento de desechos agrícolas. Mediante la aplicación del diseño Box-Behnken y el análisis de superficie de respuesta, se determinó que el volumen de sustrato y el periodo de incubación son las variables con mayor impacto sobre la productividad, a diferencia de la ozonización, cuyo efecto careció de significancia estadística. Bajo parámetros optimizados, se lograron rendimientos de  $6,00 \pm 0,56 \text{ g L}^{-1}$ , cifras que igualan o superan lo documentado en estudios previos sobre fermentación estática con otros residuos.

Asimismo, la transición del proceso a un biorreactor de 20 L validó la factibilidad técnica del sistema, conservando una operatividad estable y resultados de producción alineados con los ensayos de laboratorio. Mediante las técnicas de TGA, XRD y FTIR, se confirmó la síntesis de celulosa tipo I de elevada pureza y estabilidad térmica. No obstante, es importante señalar que dicha pureza no puede vincularse exclusivamente al uso de ozono, debido a la alta selectividad natural de la bacteria. En conclusión, el uso del JRB integrado a modelos de optimización estadística representa una ruta eficaz para generar biopolímeros de alto valor, si bien la variabilidad propia de los sustratos orgánicos plantea el reto de estandarizar los medios de cultivo y profundizar en el análisis funcional del material en futuras etapas.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

**Andres Joel Zeas Sesme:** conceptualización, *data curation*, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, metodología, administración de proyecto. **Thaily Jazmin Martínez Castillo:** conceptualización, investigación, metodología, recursos, supervisión, validación, redacción: revisión y edición. **Manuel Fiallos-Cárdenas:** análisis formal, administración

de proyecto, recursos, *software*, visualización, escritura: borrador original, redacción: revisión y edición.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE LA IA GENERATIVA

Los autores utilizaron herramientas de IA generativa únicamente para mejorar la redacción, gramática y claridad del manuscrito. La interpretación de resultados, análisis y conclusiones corresponden exclusivamente a los autores.

## REFERENCIAS

- Abdel Hakim, A., & Mourad, R. (2023). Nanocellulose and its polymer composites: Preparation, characterization, and applications. *Russian Chemical Reviews*, 92(4). <https://doi.org/10.57634/RCR5076>
- Abdoussalami, A., Hu, Z., Islam, A. R. M. T., & Wu, Z. (2023). Climate change and its impacts on banana production: A systematic analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 25(11), 12217-12246. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03168-2>
- Al-Baarri, A. N., Legowo, A. M., Abduh, S. B. M., Mawarid, A. A., Farizha, K. M., & Silvia, M. (2019). Production of ozone and the simple detection using potassium iodide titration method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 292(1), 12062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/292/1/012062>
- Almeida, D. M., Aparecida Prestes, R., Fonseca, A. F. da, Woiciechowski, A. L., & Wosiacki, G. (2013). Minerals consumption by *Acetobacter xylinum* on cultivation medium on coconut water. *Brazilian Journal of Microbiology*, 44(1), 197-206. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822013005000012>
- Alzate Acevedo, S., Díaz Carrillo, Á. J., Flórez-López, E., & Grande-Tovar, C. D. (2021). Recovery of banana waste-loss from production and processing: A contribution to a circular economy. *Molecules*, 26(17), 5282. <https://doi.org/10.3390/molecules26175282>
- Arias-Roblero, M., Mora-Villalobos, V., & Velazquez-Carrillo, C. (2021). Evaluation of fed-batch fermentation for production of polyhydroxybutyrate with a banana pulp juice substrate from an agro industrial by-product. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.681596>
- Barbadillo Jove, F. (2015). *Estudio cinético de degradación térmica de poliuretanos mediante análisis termogravimétrico (TGA)* [Tesis doctoral, Universidad de La Coruña]. Repositorio Instucional da Universidade da Coruña. <http://hdl.handle.net/2183/14521>

- Bhattacharya, A., Sadaf, A., Dubey, S., Singh, R. P., & Khare, S. K. (2021). Production and characterization of *Komagataeibacter xylinus* SGP8 nanocellulose and its calcite based composite for removal of Cd ions. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 46423-46430. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08845-7>
- Bonifazi, G., Gasbarrone, R., & Serranti, S. (2023). Evaluation of sugar content in hopped wort of artisanal beer by shortwave infrared spectroscopy. En M. S. Kim & B.-K. Cho (Eds.), *Sensing for agriculture and food quality and safety XV*. SPIE Defense + Commercial Sensing. <https://doi.org/10.1117/12.2663382>
- Borsoi, C., Zimmernnam, M. V. G., Zattera, A. J., Santana, R. M. C., & Ferreira, C. A. (2016). Thermal degradation behavior of cellulose nanofibers and nanowhiskers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 126, 1867-1878. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5653-x>
- Burgos Montañez, L. J. (2020). Cuantificación de azúcares reductores del sustrato en residuos de piña con el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico. *Revista de Investigación*, 13(1), 57-66. <https://doi.org/10.29097/23461098.308>
- Choudhary, A., Kumar, A., Kandpal, R., Gupta, A. K., Jha, A. K., Naik, B., Kumar, V., Rustagi, S., Chutia, H., & Khan, J. M. (2024). Evaluation of secondary metabolites, nutraceutical potential and amino acid profile of fresh dates (*Phoenix dactylifera*) alcoholic beverage. *Discover Food*, 4, Artículo 53. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00137-0>
- Deumaga, M. F. T., Emaga, T. H., Tchokouassom, R., Vanderghem, C., Aguedo, M., Gillet, S., Jacquet, N., Danthine, S., Magali, D., & Richel, A. (2015). Genotype contribution to the chemical composition of banana rachis and implications for thermo/biochemical conversion. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 5, 409-416. <https://doi.org/10.1007/s13399-015-0158-6>
- Fiallos-Cardenas, M., Gavin, C., Huilcarema-Enríquez, K., Cumbicus-Bravo, A., & Pozo, F. (2025). Innovation in obtaining bacterial nanocellulose from banana rachis: Effects of ozone treatment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101044. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.101044>
- Fiallos-Cárdenas, M., Pérez-Martínez, S., & Ramirez, A. D. (2022). Perspectives for the development of a circular bioeconomy around the banana value chain. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 541-555. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.014>
- Fiallos-Cárdenas, M., Ramirez, A. D., Pérez-Martínez, S., Bonilla, H. R., Ordoñez-Viñan, M., Ruiz-Barzola, O., & Reinoso, M. A. (2021). Bacterial nanocellulose derived from banana leaf extract: Yield and variation factors. *Resources*, 10(12), 121. <https://doi.org/10.3390/resources10120121>

- García-Cubero, M. T., González-Benito, G., Indacochea, I., Coca, M., & Bolado, S. (2009). Effect of ozonolysis pretreatment on enzymatic digestibility of wheat and rye straw. *Bioresource Technology*, *100*(4), 1608-1613. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.012>
- Guevara, K. M., Martínez-Valenzuela, G., Sánchez-Vásquez, V., Guerrero-Ruiz, K., & Fiallos-Cárdenas, M. (2025). Trends and perspectives on bacterial nanocellulose: A comprehensive analysis from the three helixes of innovation. *Materials Today Sustainability*, *30*, Artículo 101090. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101090>
- Huang, C., Guo, H.-J., Xiong, L., Wang, B., Shi, S.-L., Chen, X.-F., Lin, X.-Q., Wang, C., Luo, J., & Chen, X.-D. (2016). Using wastewater after lipid fermentation as substrate for bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus*. *Carbohydrate Polymers*, *136*, 198-202. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.09.043>
- Irving, D., Bakhshandeh, S., Tran, T. K. A., & McBratney, A. B. (2024). A cost-effective method for quantifying soil respiration. *Soil Security*, *16*, 100162. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100162>
- Jahed, E., Khodaparast, M. H. H., & Mousavi Khaneghah, A. (2014). Bentonite, temperature and pH effects on purification indexes of raw sugar beet juice to production of inverted liquid sugar. *Applied Clay Science*, *102*, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.09.036>
- Jeridi, M., Siddiqui, S., Siddiqua, A., Moneim, D. A., Aika, E. A. M., Zahrani, F., Essenidi, M., & Ferchichi, A. (2023). Nutritional analysis of fresh banana fruits (*Musa spp.*) grown in South Tunisia. *Bangladesh Journal of Botany*, *52*(2), 253-260. <https://doi.org/10.3329/bjb.v52i2.67010>
- Kumari, P., Ravi Kiran, B., & Venkata Mohan, S. (2022). Polyhydroxybutyrate production by *Chlorella sorokiniana* SVMIICT8 under nutrient-deprived mixotrophy. *Bioresource Technology*, *354*, Artículo 127135. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127135>
- Lima, H. L. S., Nascimento, E. S., Andrade, F. K., Brígida, A. I. S., Borges, M. F., Cassales, A. R., Muniz, C. R., Souza Filho, M. D. S. M., Morais, J. P. S., & Rosa, M. D. F. (2017). Bacterial cellulose production by *Komagataeibacter hansenii* ATCC 23769 using sisal juice—An agroindustry waste. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, *34*(3), 671-680. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170343s20150514>
- Martínez-Solórzano, G. E., & Rey-Brina, J. C. (2021). Bananos (*Musa AAA*): importancia, producción y comercio en tiempos de COVID-19. *Agronomía Mesoamericana*, *32*(3), 1034-1046. <https://doi.org/10.15517/am.v32i3.43610>

- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426-428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- Minardi, C., Bersanetti, D., Sarlin, E., Santala, V., & Mangayil, R. (2024). Optimization of citrus pulp waste-based medium for improved bacterial nanocellulose production. *Microorganisms*, 12(10), 2095. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12102095>
- Mulyono, Nurbaiti, Rilyanti, M., & Herasari, D. (2024). Liquid pineapple waste as substrate for the production of bacterial nanocellulose (BNC) by local isolated microbe Kc-D-4. *AIP Conference Proceedings*, 2970(1), 60013. <https://doi.org/10.1063/5.0210870>
- Muñoz S., K., Ponce G., M., Burgos B., G., Alcívar C., U., & Munizaga P., D. (2025). Capacidad antioxidante y composición fenólica en extractos de cerveza artesanal tipo ale. *infoANALÍTICA*, 13(1), 45-75. <https://doi.org/10.26807/ia.v13i1.283>
- Nanda, S., Patra, B. R., Patel, R., Bakos, J., & Dalai, A. K. (2022). Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 379-395. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01334-4>
- Nascimento, R., Carvalheira, M., Crespo, J., & Neves, L. (2023). Extraction and characterization of cellulose obtained from banana plant pseudostem. *Clean Technologies*, 5(3), 1028-1043. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol5030052>
- Ono, Y., Takeuchi, M., Kimura, S., Puangsin, B., Wu, C.-N., & Isogai, A. (2022). Structures, molar mass distributions, and morphologies of TEMPO-oxidized bacterial cellulose fibrils. *Cellulose*, 29(9), 4977-4992. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04617-3>
- Pacheco, G., Mello, C. V. de, Chiari-Andréo, B. G., Isaac, V. L. B., Ribeiro, S. J. L., Pecoraro, É., & Trovatti, E. (2018). Bacterial cellulose skin masks-properties and sensory tests. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 17(5), 840-847. <https://doi.org/10.1111/jocd.12441>
- Pereira, B., Li, Z.-J., De Mey, M., Lim, C. G., Zhang, H., Hoeltgen, C., & Stephanopoulos, G. (2016). Efficient utilization of pentoses for bioproduction of the renewable two-carbon compounds ethylene glycol and glycolate. *Metabolic Engineering*, 34, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2015.12.004>
- Peretz, R., Sterenzon, E., Gerchman, Y., Kumar Vadivel, V., Luxbacher, T., & Mamane, H. (2019). Nanocellulose production from recycled paper mill sludge using ozonation pretreatment followed by recyclable maleic acid hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, 216, 343-351. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.003>
- Pineda, L., Caicedo, L. M., & Riascos, C. (2012). Técnicas de fermentación y aplicaciones de la celulosa bacteriana: una revisión. *Ingeniería y Ciencia*, 8(16), 307-335. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.8.16.12>

- Ruiz-Molina, V. E., Soriano-Melgar, L. de A. A., Cortez-Mazatán, G. Y., Hernández-Zárate, G., Castillo-Zamudio, R. I., Flores-Estévez, N., Peralta-Rodríguez, R. D., & Noa-Carrazana, J. C. (2025). The potential effect of banana by-products on the *in vitro* inhibition of *Lasiodiplodia theobromae* and *Colletotrichum* sp. *Journal of Agriculture and Food Research*, 22, 102055. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102055>
- Saleh, A. K., El-Gendi, H., Ray, J. B., & Taha, T. H. (2021). A low-cost effective media from starch kitchen waste for bacterial cellulose production and its application as simultaneous absorbance for methylene blue dye removal. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 12437-12449. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01973-1>
- Samanta, P., Senapati, T., Dey, S., & Ghosh, A. R. (2023). An overview of biomass conversion from agricultural waste: Address on environmental sustainability. En S. Singh, P. Singh, A. Sharma & M. Choudhury (Eds.), *Agriculture Waste Management and Bioresource: The Circular Economy Perspective* (pp. 46-77). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119808428.ch3>
- Segal, L., Creely, J. J., Martin, A. E. Jr., & Conrad, C. M. (1959). An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-Ray diffractometer. *Textile Research Journal*, 29(10), 786-794. <https://doi.org/10.1177/004051755902901003>
- Syafri, E., Jamaluddin, Sari, N. H., Mahardika, M., Amanda, P., & Ilyas, R. A. (2022). Isolation and characterization of cellulose nanofibers from *Agave gigantea* by chemical-mechanical treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 200, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.111>
- Tamo, A. K., Doench, I., Deffo, G., Jiokeng, S. L. Z., Doungmo, G., Ghislain Fotsop, C., Temgoua, R. C. T., Montebault, A., Serghei, A., Njanja, E., Tonle, I. K., & Osorio-Madrado, A. (2025). Lignocellulosic biomass and its main structural polymers as sustainable materials for (bio)sensing applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 13(30), 24185-24253. <https://doi.org/10.1039/D5TA02900G>
- Tippmann, S., Anfelt, J., David, F., Rand, J. M., Siewers, V., Uhlén, M., Nielsen, J., & Hudson, E. P. (2017). Affibody scaffolds improve sesquiterpene production in *Saccharomyces cerevisiae*. En *ACS Synthetic Biology*, 6(1), 19-28. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.6b00109>
- Valenzuela-Cobos, J. D., Pérez-Martínez, S., Fiallos-Cárdenas, M., & Guevara-Viejó, F. (2024). Data mining for the characterization of a paper prototype obtained with bacterial cellulose derived from banana and pineapple by-products. *Applied Sciences*, 14(23), 11426. <https://doi.org/10.3390/app142311426>
- Viri, I. (2025, 8 de agosto). *Standard methods for the examination of water and wastewater, 24rd edition (2022)*. Standardlab. <https://www.standardlab.com>.

ec/post/standard-methods-for-the-examination-of-water-and-wastewater-24rd-edition-2022

- Wang, S.-S., Han, Y.-H., Ye, Y.-X., Shi, X.-X., Xiang, P., Chen, D.-L., & Li, M. (2017). Physicochemical characterization of high-quality bacterial cellulose produced by *Komagataeibacter* sp. Strain W1 and identification of the associated genes in bacterial cellulose production. *RSC Advances* (71), 45145-45155. <https://doi.org/10.1039/c7ra08391b>
- Xu, L., Wang, Y.-Y., Huang, J., Chen, C.-Y., Wang, Z.-X., & Xie, H. (2020). Silver nanoparticles: Synthesis, medical applications and biosafety. *Theranostics*, 10(20), 8996-9031. <https://doi.org/10.7150/thno.45413>
- Zahan, K. A., Pa'e, N., & Muhamad, I. I. (2015). Monitoring the effect of pH on bacterial cellulose production and *Acetobacter xylinum* 0416 growth in a rotary discs reactor. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(7), 1881-1885. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1712-z>
- Zaini, H. M., Saallah, S., Roslan, J., Sulaiman, N. S., Munsu, E., Wahab, N. A., & Pindi, W. (2023). Banana biomass waste: A prospective nanocellulose source and its potential application in food industry—A review. *Heliyon*, 9(8), e18734. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18734>
- Zou, D., & Fan, Q. (2022). Present situation of globe banana production and trade and prospect for banana industry. *Guangdong Agricultural Sciences*, 49(7), 131-140. <https://doi.org/10.16768/j.issn.1004-874X.2022.07.017>

# DATOS DE LOS AUTORES

## **COMPARATIVE ERGONOMIC RISK ASSESSMENT OF MANUAL HANDLING TASKS IN A SMALL-SCALE WATER BOTTLING OPERATION USING RULA AND ERIN**

### **REINA VERÓNICA ROMÁN SALINAS**

Doctora en Administración por el Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas, maestra en Ingeniería Administrativa por el Instituto Tecnológico Superior de Pánuco e ingeniera industrial por el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Cuenta con experiencia en manufactura, logística, gestión administrativa y calidad. Ha sido directora de campus de nivel medio superior y posgrado, así como miembro del Comité de Validación de Reactivos del EGEL en Ingeniería Industrial (Geneval) y del padrón de evaluadores del CACEI. Es docente en el Instituto Tecnológico Superior de Pánuco y en el ICEST, así como autora de publicaciones científicas y candidata al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores.

### **MARCO ANTONIO DÍAZ MARTÍNEZ**

Doctor en Proyectos por la Universidad Internacional Iberoamericana, maestro en Ciencias Administrativas por la Universidad del Golfo e ingeniero industrial por la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Se desempeña como investigador en el Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, donde desarrolla trabajos en las áreas de gestión de proyectos, ingeniería industrial y optimización de procesos. Cuenta con experiencia profesional en consultoría y desarrollo de proyectos, así como en gestión académica; ha ocupado el cargo de jefe de la carrera de Ingeniería Industrial en la Universidad del Valle de México. Posee certificación avanzada en SolidWorks otorgada por Desarrollo de Manufactura Digital (DMD). Es autor de diversas publicaciones científicas en revistas nacionales e internacionales. Actualmente, es candidato al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores.

### VÍCTOR HUGO TOBÍAS MARTÍNEZ

Maestro en Ingeniería Administrativa por el Instituto Tecnológico Superior de Pánuco e ingeniero Industrial por el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Cuenta con experiencia en certificación de embarques y control de calidad en el sector de hidrocarburos. Se ha desempeñado como supervisor, inspector de importación y coordinador de operaciones a nivel nacional. Su trayectoria incluye la planeación y supervisión de procesos logísticos y portuarios. Actualmente, se desempeña como docente en áreas de estadística, calidad y administración, y en la industria como supervisor de operaciones.

### EDGAR JEARVAVI VÁZQUEZ MORENO

Maestro en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca e ingeniero industrial por el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Se desempeña como profesor de posgrado en la maestría en Ingeniería Administrativa del Instituto Tecnológico Superior de Pánuco. Cuenta con experiencia en docencia universitaria, diseño instruccional y metodología de la investigación. Su labor académica se enfoca en áreas como estadística e investigación de operaciones, así como en la asesoría y dirección de proyectos de ingeniería. Su trayectoria se caracteriza por un enfoque analítico orientado a la optimización de procesos administrativos, la innovación tecnológica y la aplicación de herramientas cuantitativas en la formación de capital humano especializado.

### RUBÉN JÉREZ CALDERÓN

Maestro en Ingeniería Administrativa en la misma institución e ingeniero industrial por el Instituto Tecnológico Superior de Pánuco. Actualmente, cursa el doctorado en Educación por la Universidad Popular Autónoma de Veracruz. Cuenta con experiencia en gestión operativa, administración de recursos, seguridad industrial y supervisión de proyectos, y se desempeña en los sectores comercial, restaurantero y de seguridad industrial. Ha participado en proyectos en PEMEX Exploración y Producción en áreas de mantenimiento y ecología. Se desempeña como docente y colabora como asesor académico. Es coautor de publicaciones y participa en proyectos de investigación aplicada.

## **EFFECTO DEL MANTENIMIENTO AUTÓNOMO Y LA ELIMINACIÓN DE PÉRDIDAS EN LA SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA: UN MODELO SEM**

### JOSÉ DARÍO VÁSQUEZ MARTÍNEZ

Licenciado en Matemáticas por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), institución donde actualmente concluye sus estudios de maestría en Ingeniería Industrial. Se desempeña como profesor de asignatura en la UACJ, donde imparte clases de matemáticas

aplicadas a la ingeniería industrial. Su experiencia académica incluye la presentación de ponencias y carteles de investigación en la UACJ. Sus líneas de investigación se centran en el mantenimiento productivo total (*total productive maintenance*, TPM), la sustentabilidad industrial y la manufactura esbelta, enfocándose en la optimización de sistemas productivos mediante modelos cuantitativos.

#### JORGE LUIS GARCÍA ALCARAZ

Cuenta con cinco doctorados: en Ciencias de la Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez (México), en Innovación en Ingeniería de Producto y Procesos Industriales por la Universidad de La Rioja (España), en Ingeniería y Tecnologías Industriales por la Universidad Pública de Navarra (España), en Ingeniería Mecánica por la Universidad de La Rioja (España) y en Ingeniería y Tecnologías de la Información por la Universidad de Lleida (España). Tiene una maestría y una licenciatura en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Colima (México). Actualmente, es profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y es autor de 377 documentos indexados en Scopus.

#### JOSÉ LUIS PEINADO PORTILLO

Cuenta con un doctorado y una maestría en Tecnologías, grados obtenidos en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), y es licenciado en Ingeniería en Sistemas Computacionales. Actualmente, se desempeña como profesor de asignatura en la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez (UTCJ), en la carrera de Mecatrónica, donde imparte materias relacionadas con tecnologías de la información y matemáticas. Cuenta con dos capítulos de libro y dos artículos enfocados en el área de optimización.

### **ENHANCING PRODUCTIVITY AND MINIMIZING WELDING DEFECTS IN STEEL MESH MANUFACTURING THROUGH THE IMPLEMENTATION OF A PHYSICAL POKA-YOKE DEVICE**

#### JESÚS CRUZ GARZA MORENO

Posee títulos de doctorado y máster en Ingeniería Eléctrica y Electrónica con especialización en optimización por parte de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Es ingeniero industrial especializado en manufactura por el Instituto Tecnológico de Reynosa. Es miembro de nivel 1 del Sistema Nacional de Investigadores de México y actualmente es profesor investigador en la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Su investigación se centra en la ingeniería de la innovación, la optimización de *software*, las matrices de antenas y la optimización de procesos industriales. Tiene experiencia en programación, herramientas

de optimización y la aplicación de IA en las Industrias 4.0 y 5.0. Es coautor de proyectos de investigación, capítulos de libros y artículos científicos en revistas indexadas.

#### LUZ IDALIA BALDERAS GARCÍA

Doctora en Ingeniería Eléctrica y Electrónica por la Universidad Autónoma de Tamaulipas, maestra en Ingeniería Eléctrica y Electrónica con énfasis en Computación e ingeniería en Sistemas Computacionales. Es profesora e investigadora en la Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Rodhe y miembro del cuerpo académico de Innovación en Sistemas de Telecomunicaciones e Industriales. Actualmente, lleva a cabo actividades en el desarrollo, fabricación y medición de agrupaciones de antenas, de las cuales ha realizado publicaciones JCR, en revistas indexadas, ponencias y conferencias nacionales e internacionales. Es miembro de la Academia de Producción y Calidad, así como de la Academia de Electrónica, y, actualmente, pertenece a la Sociedad de Antenas y Propagación del IEEE.

#### YADIRA ARACELY FUENTES RUBIO

Doctora en Ingeniería Eléctrica y Electrónica por la Universidad Autónoma de Tamaulipas, donde actualmente es profesora-investigadora. Es maestra en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, e ingeniera eléctrica. Es miembro nivel C del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. Su línea de investigación se centra en el desarrollo de sensores ópticos basados en fibra óptica y dispositivos fotónicos aplicados. Cuenta con experiencia en optimización de procesos industriales mediante metodologías *green lean six sigma* y eficiencia energética. Ha participado en proyectos de investigación aplicada, y es autora y coautora de artículos científicos y de divulgación en revistas indexadas.

#### AZAHEL TREVIÑO VILLEGAS

Maestro en Ingeniería Eléctrica y Electrónica por la Universidad Autónoma de Tamaulipas e ingeniero en Sistemas de Producción. Se desempeña como profesor en la Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Rodhe de la misma institución. Actualmente, funge como coordinador de la carrera de Ingeniería en Sistemas de Producción, en la que participa activamente en la formación académica de estudiantes universitarios y en actividades de gestión académica, con interés en la mejora de los procesos educativos y el desarrollo de competencias en el ámbito de la ingeniería y los sistemas de producción.

#### LOURDES YAHAIRA GARCÍA RIVERA

Maestra y licenciada en Ingeniería por la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Actualmente, está afiliada a la Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Rodhe. Su formación

académica está orientada a la ingeniería industrial y a la optimización de procesos. Tiene experiencia en la participación en proyectos de investigación centrados en la simulación, el rediseño y la mejora de procesos industriales dentro de entornos de la industria 4.0. Ha colaborado como coautora en publicaciones científicas en revistas revisadas por pares, especialmente en áreas relacionadas con la optimización de líneas de montaje y de sistemas avanzados de fabricación. Sus actividades profesionales están vinculadas al ámbito académico, donde apoya la investigación y el desarrollo de soluciones innovadoras para aplicaciones industriales.

## **MARCO ESTRATÉGICO-TÁCTICO INTEGRADO PARA EL DISEÑO DE CADENAS DE SUMINISTRO AGROALIMENTARIAS DE EXPORTACIÓN MEDIANTE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN MILP MULTIPERIODO**

ERBERTH CRUZ PAREDES

Ingeniero industrial por la Universidad Nacional de San Agustín, egresado de la maestría en Gestión de Operaciones y Servicios Logísticos por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y de la maestría en Ciencias en Ingeniería Industrial por la Universidad Nacional de Ingeniería. Cuenta con una especialización en *supply chain management* por la Pontificia Universidad Católica del Perú. Su experiencia laboral incluye roles como analista de ingeniería en Textil del Valle, así como analista de administración, operaciones y logística en Corporación Rico S. A. C., donde actualmente se desempeña como analista sénior de operaciones y logística. Además, ejerce funciones como asesor en gestión empresarial de manera independiente.

## **OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE LÍNEAS DE PRODUCCIÓN MEDIANTE LA AUTOMATIZACIÓN DE CAPTURA DE DATOS Y SISTEMAS SCADA EN TIEMPO REAL**

ALI JOSÉ CÉSPEDES VERA

Maestro en Ingeniería Industrial con mención en Gerencia por la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre. Es ingeniero industrial por el Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño e ingeniero en instrumentación y control por la Universidad Politécnica Territorial de Falcón "Alonso Gamero". Es licenciado en Administración por la Universidad del Zulia y, actualmente, cursa el doctorado en Gerencia Tecnológica y Evaluativa en la Universidad Nacional del Táchira. Cuenta con más de veinte años de trayectoria profesional en los sectores de manufactura y alimentos, donde se ha desempeñado como gerente de envasado en Pepsi Cola Venezuela y como docente en el Instituto Universitario de Profesiones Gerenciales.

## **DISCRETE-EVENT SIMULATION OF THE COCOA VALUE CHAIN IN PUERTO ASÍS, COLOMBIA: COMPARATIVE EFFECTS OF TECHNIFICATION AND WORKFORCE SCALING**

**JAMES MAURICIO ENRÍQUEZ RODRÍGUEZ**

Magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad Nacional de Colombia e ingeniero agrícola. Su trayectoria profesional se ha desarrollado en el ámbito académico y en la formación técnica; además, cuenta con experiencia en docencia, investigación aplicada y acompañamiento de proyectos en ingeniería industrial y logística. Actualmente, se desempeña como profesor investigador en la Facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria Iberoamericana, en Bogotá, Colombia, y como instructor virtual del Servicio Nacional de Aprendizaje, donde participa en procesos de formación relacionados con gestión agroempresarial, logística y desarrollo productivo.

**MÓNICA LIZETH SÁNCHEZ ARÉVALO**

Magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Es ingeniera industrial y doctoranda en Pensamiento Complejo en la Multiversidad Mundo Real-Edgar Morin. Se desempeña como docente e investigadora, y participa en procesos de aseguramiento de la calidad académica y desarrollo curricular en programas del área de ingeniería. Su experiencia profesional se centra en educación superior, investigación académica, análisis de información científica y desarrollo de proyectos relacionados con gestión e innovación.

## **VALORIZACIÓN DE VALVAS DE *ARGOPECTEN PURPURATUS* EN LA FORMULACIÓN DE JABÓN EXFOLIANTE PARA REDUCIR RESIDUOS EN PIURA**

**JOCELLYN NALLELY PEÑA JIMENEZ**

Egresada de Ingeniería Industrial por la Universidad César Vallejo, campus Piura. Cuenta con formación en gestión de procesos, análisis de datos, seguridad y salud ocupacional, y mejora continua. Actualmente, se desempeña en el Área Administrativa y de Gestión de Almacenes en la empresa Nortfarma S. A. C., donde participa en actividades de control de inventarios, organización de recursos, registro de información y apoyo en la optimización de procesos operativos. Ha participado en proyectos académicos de innovación y emprendimiento desarrollados en el ámbito universitario, orientados al desarrollo de productos sostenibles y al aprovechamiento responsable de recursos.

#### UBALDO IAIR TRELLES SALAZAR

Egresado de Ingeniería Industrial por la Universidad César Vallejo, campus Piura. Cuenta con formación en gestión de procesos, análisis de datos, seguridad y salud ocupacional, y mejora continua. Actualmente, participa en actividades vinculadas al Área de Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente (SSOMA) en la Universidad César Vallejo, donde colabora en inspecciones, elaboración de reportes técnicos, registros de campo y seguimiento de medidas preventivas orientadas a la gestión de riesgos laborales. Asimismo, posee experiencia en actividades de control, supervisión y apoyo operativo en entornos organizacionales.

#### GABRIEL ERNESTO BORRERO CARRASCO

Magíster en Administración de Negocios y Relaciones Internacionales por la Universidad César Vallejo e ingeniero industrial por la Universidad Nacional de Piura. Su trayectoria académica y profesional se orienta a la gestión de procesos, el análisis organizacional y la mejora continua en entornos empresariales. Ha desarrollado investigaciones en áreas como la generación de valor agregado en productos agroindustriales, la aplicación de minería de texto y análisis de sentimientos en redes sociales, el clima organizacional y su relación con la satisfacción del cliente, así como en responsabilidad social empresarial, destacando propuestas aplicadas a contextos productivos y de servicios en el ámbito latinoamericano.

### **MEJORA PARA REDUCIR LA TASA DE RECHAZO DE PIEZAS DEFECTUOSAS EN UNA EMPRESA DE NAVES INDUSTRIALES DEL SECTOR METALMECÁNICO APLICANDO SPC, TPM Y 5S**

#### NOEMI YASMIN CARITA GALINDO

Bachiller en Ingeniería Industrial por la Universidad de Lima. Actualmente, se desempeña como *operations assistant* en una empresa dedicada a la comercialización de válvulas, donde participa en la coordinación y validación de fechas de entrega, asegurando el cumplimiento oportuno de pedidos. Cuenta con experiencia en planificación de despachos, organización de reuniones interáreas y supervisión de procesos logísticos. Su trayectoria profesional evidencia interés en la optimización de procesos y la mejora de la gestión operativa, lo que contribuye a la satisfacción del cliente final.

#### NICOLE NAHOMI VILLANUEVA ALARCÓN

Bachiller en Ingeniería Industrial por la Universidad de Lima. Actualmente, se desempeña como *student internal* en la empresa Metso Perú, donde participa en actividades vinculadas a la gestión y el análisis de procesos en entornos industriales. Cuenta con experiencia en apoyo a la optimización de procesos y al análisis organizacional, fortaleciendo habilidades

en mejora continua y gestión operativa. Ha participado en el desarrollo de proyectos académicos enfocados en la eficiencia operativa y la gestión de la cadena de suministro. Sus intereses profesionales se centran en la mejora de procesos, compensaciones y analítica aplicada a la gestión empresarial.

#### WILSON DAVID CALDERÓN GONZALES

Magíster en Administración Estratégica de Empresas por Centrum PUCP. Es ingeniero industrial por la Universidad de Lima y candidato a doctor en Administración de Empresas por la misma universidad. Actualmente, se desempeña como gerente de operaciones en una franquicia de Telefónica Movistar, donde lidera la gestión operativa a nivel nacional. Cuenta con más de dieciséis años de experiencia en operaciones, gestión comercial y finanzas en sectores como telecomunicaciones, construcción y manufactura. Asimismo, se desempeña como docente universitario de programas de pregrado y posgrado en la Universidad de Lima.

#### EXPERIMENTAL ANALYSIS OF INDUSTRIAL PACKAGING FOR *CHICHA DE JORA* IN LAMINATED CARDBOARD

#### MARCOS ANTONIO GUARDAMINO CASTRO

Bachiller en Ingeniería Industrial por la Universidad de Lima. Actualmente, se desempeña como asistente de nóminas en el Banco Pichincha, empresa del sector financiero, donde participa en procesos de planificación financiera, gestión de riesgos y monitoreo financiero. Previamente, se desempeñó en el área administrativa del sector publicitario, desempeñando funciones vinculadas a la gestión documentaria y el control de inventarios.

#### MARCOS LUIS HUMBERTO SÁNCHEZ FERRER MARENGO

Bachiller en Ingeniería Industrial por la Universidad de Lima. Actualmente, se desempeña como asistente de presupuestos en Adium Perú, empresa del sector farmacéutico, donde participa en procesos de planificación financiera, control presupuestal y análisis de desviaciones en la gestión. Previamente, se desempeñó en el área de planeamiento financiero del sector financiero, donde realizó funciones de similar índole vinculadas al *controlling*.

#### MARCOS FERNANDO RUIZ-RUIZ

Doctor en Ciencias de la Educación por la Pontificia Universidad Católica del Perú, magíster en Educación por la Universidad de Piura e ingeniero industrial por la Universidad de Lima. Sus líneas de investigación se centran en la prospectiva educativa y de la ingeniería, el análisis estructural y los estudios sociales aplicados al género en la educación STEM. Cuenta con un diploma de experto en Estudios Prospectivos por la Universidad Nacional

de Educación a Distancia (España) y es investigador reconocido por el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica.

### **SELECCIÓN ÓPTIMA DE PROVEEDORES MEDIANTE ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD Y COSTOS BASADO EN LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL APLICADO AL SECTOR AUTOMOTOR**

JUAN MANUEL IZAR LANDETA

Doctor en Administración por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí e ingeniero industrial por la Universidad de Lima. Es profesor investigador del Instituto Tecnológico Superior de Rioverde, con más de 40 años de experiencia en la academia, tiene 18 libros publicados, más de 125 artículos de investigación y divulgación, más de 80 ponencias en congresos nacionales e internacionales, y es miembro nivel II del Sistema Nacional de Investigadores en México. Sus áreas de especialidad son la administración y la ingeniería, específicamente en investigación de operaciones, estadística, ingeniería económica, gestión y evaluación de proyectos, finanzas, gestión de la calidad, administración de la educación y desempeño de las organizaciones.

IVANNA LÓPEZ REYNA

Ingeniera en Mecatrónica por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, campus Rioverde. Se desempeña como docente en el Instituto Tecnológico Superior de Rioverde y en la Facultad de Estudios Profesionales Zona Media. Su experiencia profesional se enfoca en el área de automatización, el diseño asistido por computadora y la aplicación de tecnologías en procesos industriales. Ha participado en la elaboración de trabajos de investigación académica.

### **DISEÑO DE UN MODELO DE GESTIÓN ESTRATÉGICA BASADO EN *BALANCED SCORECARD* PARA LA MEJORA DEL DESEMPEÑO INSTITUCIONAL EN UNA INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN BÁSICA PRIVADA EN COLOMBIA**

DAVID ENRIQUE URIBE SUAREZ

Doctor en Educación Matemática por la Universidad Antonio Nariño, magíster en Administración de Empresas e ingeniero industrial por la Universidad de La Guajira. Es especialista en Pedagogía y Docencia Universitaria de la Fundación Universitaria del Área Andina. Actualmente, se desempeña como docente universitario en la Universidad Antonio Nariño, sede Riohacha. Ha liderado y participado en proyectos de investigación enfocados en la gestión organizacional, la educación matemática y la viabilidad empresarial. Cuenta con publicaciones científicas en revistas indexadas.

### YERIS BAQUERO BOLAÑOS

Aspirante al título de ingeniero industrial por la Universidad Antonio Nariño. Actualmente, se desempeña como analista en el Departamento de Perforación y Voladura de Cerrejón de una empresa minera de carbón ubicada en Albania, La Guajira, Colombia. Su experiencia profesional se orienta al análisis de procesos operativos, gestión de información y apoyo en la toma de decisiones en entornos industriales.

### JOSÉ RICARDO FUENTES JARAMILLO

Aspirante al título de ingeniero industrial por la Universidad Antonio Nariño. Actualmente, se desempeña como supervisor en la zona de puerto de la empresa Cerrejón, en La Guajira, Colombia. Su experiencia profesional se centra en la supervisión de operaciones logísticas e industriales, así como en la gestión de procesos operativos en entornos de alta complejidad.

## **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE ADICIÓN DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO COMO AGENTE OXIDANTE EN EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN CIANURADA PARA MEJORAR LA EXTRACCIÓN DE ORO**

### WASHINGTON OMAR ESPINOZA RAMON

Magíster en Ingeniería Ambiental y Seguridad Industrial en la Universidad Nacional de Piura, magíster en Minas en la Escuela Politécnica del Litoral e ingeniero químico por la Universidad Técnica de Machala. Es docente contratado de la Universidad Técnica de Machala, con diez años de experiencia en el dictado de las cátedras de Metalurgia Extractiva y Mineralogía en la carrera de Ingeniería Química, de cuyos proyectos de vinculación con la sociedad se encarga. Es consultor ambiental categoría I acreditado por el Ministerio de Ambiente y Energía, y asesor en temas ambientales mineros y de sustancias químicas peligrosas con más de dieciocho años de experiencia.

### BRAULIO ABSALÓN MADRID CELI

Magíster en Ingeniería Industrial con mención en Gestión de Operaciones y Logística por la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo (Perú), magíster en Dirección y Administración de Empresas (Master in Business Administration) por la Universidad Internacional de La Rioja (España) e ingeniero petroquímico por la Universidad Nacional Experimental Politécnica de las Fuerzas Armadas (Venezuela). Es profesor titular de la Universidad Técnica de Machala con diez años de experiencia en el dictado de cátedras en la carrera de Ingeniería Química. Es integrante del grupo de investigación Bioingeniería, con producción científica en revistas indexadas en temas de valorización de residuos y seguridad y salud ocupacional.

#### GARY HITLER MUÑOZ BRAVO

Magíster en Seguridad, Higiene Industrial y Salud Ocupacional e ingeniero químico por la Universidad Técnica de Machala. Actualmente, cursa el doctorado en Ingeniería Industrial en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima, Perú) y el máster de Formación Permanente en IA para la Ciencia del Comportamiento por la Universidad Internacional de La Rioja (España). Es profesor titular de la Universidad Técnica de Machala, con diez años de experiencia en el dictado de cátedras en la carrera de Ingeniería Química y Bioquímica y Farmacia. Es integrante del grupo de investigación Bioingeniería, con producción científica en revistas indexadas en temas de valorización de residuos y seguridad y salud ocupacional.

#### CARMÍN AYDEE DE GRACIA PÉREZ

Magíster en Gestión Ambiental por la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (Ecuador) e ingeniera petroquímica por la Universidad Nacional Experimental Politécnica de las Fuerzas Armadas (Venezuela). Cuenta con un diplomado internacional en Gestión de la Higiene y Seguridad Industrial por el Politécnico de Colombia. Ejerce funciones como capacitadora del Centro de Educación Continua de la Universidad Técnica de Machala. Su producción científica en revistas regionales indexadas se vincula a temas de valorización de residuos y monitoreo y conservación del medioambiente. Es consultora en el Área de Ingeniería Ambiental.

#### SUSANA ELIZABETH BLACIO TORO

Doctora en Química Industrial, graduada en la Universidad Técnica de Machala y magíster en Química Aplicada por la Universidad Técnica Particular de Loja. Actualmente, cursa el doctorado en Ciencias Aplicadas en la Universidad Nacional de Cuyo en Argentina. Es profesora titular de la Universidad Técnica de Machala, con once años de experiencia en la actividad de docencia universitaria, directora de proyecto de vinculación y miembro de proyectos de investigación con producción científica en revistas indexadas.

#### **PRODUCCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE CELULOSA BACTERIANA A PARTIR DE JUGO DE RAQUIS DE BANANO (*MUSA SPP.*) PRETRATADO CON OZONO MEDIANTE DISEÑO BOX-BEHNKEN**

#### ANDRES JOEL ZEAS SESME

Ingeniero en Biotecnología por la Universidad Estatal de Milagro en Ecuador, institución donde actualmente cursa su maestría en Biotecnología. Su trayectoria profesional incluye el desempeño como asistente técnico de investigación y asistente de laboratorio en la misma casa de estudios, donde participó en proyectos enfocados en la bioeconomía circular y el diseño experimental de bioprocesos. En la actualidad, ejerce como docente en la Unidad

Educativa Albert Einstein en Milagro, Ecuador. Su labor científica se especializa en la optimización de la producción de celulosa bacteriana a partir de jugo de raquis de banano mediante pretratamiento con ozono, utilizando modelos avanzados como ANN y RSM.

#### THAILY JAZMIN MARTÍNEZ CASTILLO

Ingeniera en Biotecnología por la Universidad Estatal de Milagro en Ecuador, donde actualmente cursa la maestría en Biotecnología. Su formación académica se ha orientado a la aplicación de la biotecnología en sistemas productivos, con énfasis en el control de calidad y el aseguramiento de procesos. Actualmente, se desempeña en el Área de Control de Calidad de la empresa camaronera Tropack, donde es responsable de la verificación, monitoreo y cumplimiento de los estándares aplicables a los procesos productivos, garantizando la inocuidad y la calidad del producto final.

#### MANUEL ALEJANDRO FIALLOS CÁRDENAS

Ingeniero químico por la Universidad de Guayaquil y biotecnólogo por la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), especializado en la transformación de residuos agroindustriales en bioproductos de alto valor. Como profesor e investigador en la Universidad Ikiam, lidera iniciativas de sostenibilidad y bioeconomía circular en la Amazonía. Es un experto reconocido en la producción de nanocelulosa bacteriana y su aplicación en soluciones de empaque ecológicas, donde integra análisis técnicos, económicos y ambientales.

