

ISSN-e: 2737-6419 DOI: 10.47460/athenea.v6i22

Athenea

Volumen 6, Número 22, 2025



*La ingeniería y las ciencias aplicadas transforman el conocimiento
en soluciones, y la investigación en progreso al servicio de la
sociedad.*

Revista Athenea

Revista electrónica editada por AutanaBooks

Publicación continua

Volumen 6 | oct-dic, 2025

DOI: 10.47460/athenea **ISSN-e:** 2737-6419

Nuestra Portada



Font: canva.com

licence: 03422-17578080

Vol. 6 // Núm. 22

octubre-diciembre

DOI: 10.47460/athenea

ISSN: 2737-6419

En nuestra presenta una figura humanoide rodeada con gráficos estadísticos, diagramas circulares y tendencias de crecimiento. Esta composición visual simboliza el papel de la IA como herramienta de análisis y apoyo en la toma de decisiones, mostrando cómo los datos se convierten en información estratégica mediante procesos de interpretación y modelado computacional.

Portal de la revista:

<https://athenea.autanabooks.com/index.php/revista>

Producción y visibilidad

Editor de Estilo

Dra. Franyelit Suárez-Carreño.

Editor de Producción, indexación y métricas

Ing. Ángel Lezama.

Editor de Idioma

Fausto Bartolotta

Adrián Hauser

Nota editorial

Los artículos y las opiniones manifestadas por nuestros colaboradores no necesariamente reflejan la línea editorial o institucional de AutanaBooks y pueden ser reproducidos con autorización previa del Editor. En este caso, favor citar la fuente y enviar copias del medio utilizado a AutanaBooks, Sector Mitad del Mundo, Quito, Ecuador.

Comité Editorial

Entidad Editora

Editorial: AutanaBooks.

Venezuela: Municipio Libertador, Parroquia Santa Teresa, Av. Lecuna. Cipreses a Hoyo. Edif. Berret, Piso 8, Oficina 8-B, Caracas, Código postal: 1012, Venezuela.

Correo de contacto: editorial@autanabooks.com

Directorio de Athenea Revista en Ciencias de la Ingeniería

Consejo Editorial

Ph.D. Franyelit Suárez. AutanaBooks, Quito, Ecuador.

editorial@autanabooks.com

0000-0002-8763-5513

Comité Académico

Dr. José García-Arroyo. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), España.

jagarcia@uees.edu.ec

0000-0001-9905-1374

Dr. Oscar Dam. Universidad Experimental Politécnica UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela.

oscar.curmetals1@gmail.com

0000-0002-0594-6757

Dr. Valentina Millano. Centro de Estudios de Corrosión (CEC), Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.

millanov@fing.luz.edu.ve, millanov@gmail.com

0000-0001-6138-4747

Dr. Edwin Flórez Gómez. Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico.

edwin.florez@upr.edu

0000-0003-4142-3985

Dr. Ana Hilda Márquez. Universidad Metropolitana de Quito, Quito, Ecuador.

amarquez@umet.edu.ec

0000-0002-7958-420X

Dr. Diana Cristina Morales Urrutia. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

dc.moralesu@uta.edu.ec

0000-0002-9693-3192

Dr. Yelka Martina López Cuadra. Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar Leguía de Bagua, Bagua, Perú.

ylopez@unibagua.edu.pe

0000-0002-3522-0658

Dra. Irela Perez Magin. Universidad Politécnica de Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico.

iperezmagin@pupr.edu

PhD. Alejandro Suarez-Alvites. Consultor, Lima, Perú.

alejandrosualvites@hotmail.com

0000-0002-9397-057X

Dr. Neris Ortega. Universidad Metropolitana de Quito, Quito, Ecuador.

nortega@umet.edu.ec

0000-0001-5643-5925

Dr. Juan Carlos Alvarado Ibáñez. Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar Leguía de Bagua, Bagua, Perú.

jalvarado@unibagua.edu.pe

0000-0002-6413-3457

Mgt. Juan Segura. Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador.

juansegura@uti.edu.ec

0000-0002-0625-0719

Dr. Jairo José Rondón Contreras. Instituto Tecnológico de Santo Domingo, República Dominicana.

rondonjjx@gmail.com / jairo.rondon@intec.edu.do

0000-0002-9738-966X

Dr. Hernán Mauricio Quisimalin Santamaria. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

hernanmquisimalin@uta.edu.ec

0000-8491-8326

Dr. Ángel González Lizardo. Polytechnic University of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico.

agonzalez@pupr.edu

0000-0002-0722-1426

Dr. Wilfredo Fariñas Coronado. Polytechnic University of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico.

wfarinascoronado@pupr.edu

0000-0003-2095-5755

Dr. Carlos Alberto Gómez Cano. Corporación Unificada Nacional de Educación Superior – CUN, Florencia, Caquetá, Colombia.

carlos_gomezca@cun.edu.co, carlosgomez325@gmail.com

0000-0003-0425-7201

Dr. Luis Concepción Atoche Alcas. I.E. N° 14100, Paita, Perú.

luisatochealcas16@gmail.com

0000-0003-1454-2129

Dr. Orlando Rafael Gil Rubio. Universidad Católica Andrés Bello, sede Ciudad Guayana, Estado Bolívar, Venezuela.

orgil@unexpo.edu.ve; orgil@ucab.edu.ve; ogil07@gmail.com.ve

0009-0005-0964-7112

Dr. Jesús Ramón López Hercules. Universidad Experimental Politécnica UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela.

Jlopezz@unexpo.edu.ve

0009-0006-4577-6728

Dra. Lourdes Margarita Meza Ruiz. Universidad Internacional Mesoamericana, Buenos Aires, Argentina.

0000-0002-3333-7051

Dr. José Calizaya-López. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

0000-0001-6221-0909

Dr. Ferdinand Eddington Ceballos Bejarano. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

0000-0003-2867-2397

Mgt. Alfredo Ruitval Velazco Gonzales. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

0000-0001-9358-3425

Mgt. Luz Gabriela Cuba Pacheco. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

0000-0003-3984-3737

Contenido (Volumen 6, Número 22 // octubre-diciembre, 2025)

- 8 Lárez Roberto Antony. *Entre cargas y emociones: una analogía electromagnética desde la Ley de Coulomb.*
- 18 Muñoz Pinto Dirxon Javier, Muñoz Pinto Dirwin Alfonso. *Mantenimiento preventivo y predictivo en centrales telefónicas: revisión teórica.*
- 28 Franco Franco Carmen Vanessa, Concha Díaz Lady Shirley, Melgar Reynoso Diana Carolina, Maceda Mogrovejo María Alejandra, Cabana Mamani Deyvin Herlin. *Desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes: un enfoque desde la ingeniería sostenible para zonas con alta demanda turística.*
- 39 Rivero Fernández Renzo Rimaneth, Rivera Pinto Stephanie Delia, Barriga García María del Carmen, Pinto Hurtado Alonzo. *Impacto de la inteligencia artificial en la toma de decisiones administrativas y la gestión de empresas emergentes.*
- 49 Calizaya López José, Carita Choquecahua Ariosto, Minaya Medina Sergio Carmelo, Pacheco Quico Miguel. *Diseño de sistemas tecnológicos sostenibles para el emprendimiento social universitario: un enfoque desde la ingeniería.*
- 60 Macías Loor Mario Ecuador, Molina Moreira Jhon Jairo. *Dosificación de hormigón estructural de resistencia por volumen aparente.*
- 69 Huacasi Añamuro Ludwin David, Bellido Medina Rildo Santos, Berrios Fernández Erick Percy, Cueva Allison Christian Herbert. *Automatización y robótica en la gestión de operaciones: retos administrativos, sociales y de innovación emprendedora.*
- 80 Cervantes Rivera Roberto, Frisancho De Martinez Ruth Antonieta Martha, Almonte Mamani Abdon, Vera Medina Eloy Armando, Ticona Lecaros Luis Felipe. *Evolución histórica de la ingeniería sanitaria y su impacto en la reducción de la mortalidad infantil.*
- 100 Marco Antonio, Huayán Monzón Franklin Edison. *Revisión sistemática de los determinantes de la transferencia tecnológica en el sector de seguridad y defensa.*

Editorial

Editorial: Ingeniería, innovación y desarrollo en un mundo en transformación

El presente número reúne contribuciones que reflejan la amplitud y el alcance de las ciencias de la ingeniería en su relación con los desafíos contemporáneos. Los trabajos abordan, desde distintas perspectivas, temáticas vinculadas con la tecnología, la sostenibilidad, la automatización y la optimización de procesos, evidenciando el papel fundamental de la ingeniería como disciplina orientada a la solución de problemas reales.

A lo largo de este volumen se destacan investigaciones que integran enfoques técnicos, analíticos e históricos, mostrando cómo el conocimiento ingenieril no solo impulsa el avance científico, sino que también fortalece el desarrollo social, productivo y económico. En conjunto, estas contribuciones permiten apreciar la ingeniería como un campo dinámico, en constante evolución, capaz de adaptarse a nuevas necesidades y de proponer alternativas innovadoras para mejorar la calidad de vida y la gestión de los recursos.

Franyelit Suárez, PhD

Editora



Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i22.107>

Entre cargas y emociones: una analogía electromagnética desde la Ley de Coulomb

Roberto Antony Lárez
<https://orcid.org/0009-0006-5540-4872>
larezroberto@gmail.com
Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre
UNEXPO-Puerto Ordaz
Estado Bolívar-Venezuela

*Autor de correspondencia: larezroberto@gmail.com

Recibido (21/08/2025), Aceptado (22/09/2025)

Resumen. Este artículo propone una analogía científica entre el campo eléctrico y el campo emocional, con base en la Ley de Coulomb. Mediante una simulación computacional, se modelan interacciones emocionales como cargas positivas, negativas o neutras, permitiendo visualizar líneas de fuerza, intensidad y superposición de campos. Se plantean escenarios que representan vínculos afectivos, tensiones o neutralidades dentro de un entorno grupal, ofreciendo una perspectiva alternativa para comprender dinámicas emocionales desde una estructura física formal. Esta propuesta se enmarca en un enfoque interdisciplinar que integra física, educación y psicología, y busca contribuir tanto a la enseñanza de conceptos abstractos como a la reflexión sobre las relaciones humanas.

Palabras clave: analogía electromagnética, campo emocional, Ley de Coulomb, simulación computacional, visualización científica, interacciones sociales, educación interdisciplinar.

Between Charges and Emotions: An Electromagnetic Analogy from Coulomb's Law

Abstract. This paper presents a scientific analogy between the electric field and the emotional field, based on Coulomb's Law. Through computational simulation, emotional interactions are modeled as positive, negative, or neutral charges, allowing the visualization of field lines, intensity, and superposition. Scenarios representing affective bonds, tensions, or neutrality within group environments are developed, offering an alternative perspective to understanding emotional dynamics through a formal physical structure. This proposal follows an interdisciplinary approach that bridges physics, education, and psychology, aiming to enhance the teaching of abstract concepts and foster reflection on human relationships.

Keywords: electromagnetic analogy, emotional field, Coulomb's Law, computational simulation, scientific visualization, social interactions, interdisciplinary education.



I. INTRODUCCIÓN

El estudio del campo eléctrico y de las fuerzas que rigen las interacciones entre cargas constituye uno de los pilares fundamentales de la física clásica [1]. Estas interacciones, formalizadas por la Ley de Coulomb y las expresiones asociadas al campo eléctrico, no solo sustentan el diseño de dispositivos electrónicos, sistemas de telecomunicación y procesos industriales, sino que también ofrecen un marco conceptual robusto para explorar fenómenos abstractos a través del pensamiento analógico. En este contexto, la presente investigación propone un enfoque innovador que consiste en emplear la física electromagnética como metáfora estructural para comprender los vínculos afectivos y emocionales del ser humano, particularmente el fenómeno de los sentimientos [2].

La física ha demostrado ser una disciplina capaz de modelar comportamientos complejos mediante leyes precisas, incluso cuando estos sistemas involucran múltiples variables y condiciones de contorno [3]. Del mismo modo, los sentimientos pueden considerarse como un sistema dinámico, no lineal, influenciado por factores internos (afinidades, personalidades, emociones) y externos (entorno social, historia de vida, cultura). Bajo esta perspectiva, se propone una analogía científica que compara a los individuos con cargas eléctricas puntuales, cuyas interacciones pueden ser atractivas o repulsivas, moduladas por la distancia emocional y condicionadas por su carga afectiva intrínseca [4].

La Ley de Coulomb, formulada por Charles-Augustin de Coulomb en 1785 [5], establece que la fuerza entre dos cargas es directamente proporcional al producto de sus magnitudes e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Esta relación matemática ha sido extensamente validada en sistemas físicos, pero aquí se explora su aplicación metafórica para describir el grado de atracción o repulsión emocional entre personas [6]. Al reinterpretar el campo eléctrico como un campo emocional, se pretende establecer un lenguaje paralelo que permita, sin sacrificar el rigor técnico, acercar los conceptos abstractos de la física a las experiencias humanas cotidianas.

Lejos de trivializar la ciencia, esta propuesta se enmarca en la tendencia pedagógica de construir puentes entre la racionalidad científica y el mundo emocional. Varios estudios han demostrado que el uso de analogías y metáforas en la enseñanza de la física mejora la comprensión conceptual y fomenta una conexión más profunda entre el conocimiento teórico y la vivencia personal [7, 8, 9, 10]. Así, hablar de atracción entre cargas no es incompatible con reflexionar sobre los vínculos humanos, siempre que se mantenga la precisión formal del modelo físico y se delimite claramente el alcance de la metáfora.

En este artículo se abordarán, con rigor técnico, los fundamentos del campo eléctrico y la Ley de Coulomb, se propondrá una analogía estructurada entre variables físicas y emocionales, y se discutirán posibles aplicaciones de este enfoque en el ámbito de la enseñanza de las ciencias. La intención es demostrar que incluso dentro de la racionalidad más estricta de la física, es posible abrir espacios para una interpretación sensible, creativa y profundamente humana del mundo.

II. DESARROLLO

El estudio del campo eléctrico constituye una base esencial en la comprensión de los fenómenos electromagnéticos. Este campo es generado por las cargas eléctricas, las cuales pueden ser positivas o negativas, y su comportamiento se describe a partir de leyes fundamentales de la física clásica. Comprender cómo interactúan las cargas, cómo se manifiestan sus efectos a través del espacio y cómo se cuantifican estas interacciones permite no solo explicar fenómenos naturales, sino también desarrollar aplicaciones tecnológicas de amplio impacto.

Una de las nociones más elementales en esta área es la **carga eléctrica**, propiedad intrínseca de ciertas partículas subatómicas como los protones y electrones. Esta propiedad es responsable de las fuerzas eléctricas que se ejercen entre ellas. Las cargas del mismo signo se repelen, mientras que las de signos opuestos se atraen, estableciendo así la base de las interacciones electrostáticas. La **ley de conservación de la carga** establece que la carga total de un sistema aislado permanece constante.

El comportamiento de las cargas puntuales en reposo se describe por la **Ley de Coulomb**, la cual establece que la magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas es directamente proporcional al producto de sus magnitudes e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Esta relación se expresa matemáticamente como:

$$\vec{F} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

donde $\vec{F}$ es la fuerza eléctrica, q_1 y q_2 son las magnitudes de las cargas, r es la distancia entre ellas, $\hat{r}$ es el vector unitario que indica la dirección de la fuerza, y k_e es la constante de Coulomb, cuyo valor en el vacío es $8.99 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$.

De manera más general, la acción de una carga sobre el espacio que la rodea se representa mediante el concepto de **campo eléctrico**. Este campo, denotado por el vector $\vec{E}$, se define como la fuerza que una carga de prueba positiva experimentaría por unidad de carga:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (2)$$

donde q_0 es la carga de prueba. Para una carga puntual, el campo eléctrico se expresa como:

$$\vec{E} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (3)$$

El campo eléctrico se puede extender a sistemas con múltiples cargas puntuales, así como a distribuciones continuas de carga, para las cuales se requiere realizar integraciones sobre la geometría del sistema, ya sea lineal, superficial o volumétrica. En tales casos, se definen las densidades de carga: $\lambda = \frac{dq}{dl}$ (lineal), $\sigma = \frac{dq}{dA}$ (superficial) y $\rho = \frac{dq}{dV}$ (volumétrica), según corresponda.

La **Ley de Gauss**, formulada a partir de la relación entre el campo eléctrico y la carga encerrada en una superficie cerrada, establece que el flujo eléctrico total a través de dicha superficie es proporcional a la carga neta encerrada:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \quad (4)$$

Esta ley es particularmente útil en problemas con simetría esférica, cilíndrica o planar, ya que permite calcular el campo sin necesidad de integrar directamente.

Otra noción clave es la del **trabajo eléctrico**, que se refiere a la energía transferida al mover una carga en el seno de un campo eléctrico. Este trabajo está relacionado con el **potencial eléctrico**, una magnitud escalar que cuantifica la energía potencial por unidad de carga. El diferencial de potencial entre dos puntos se calcula como:

$$\Delta V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (5)$$

En consecuencia, se puede definir el campo eléctrico también como el gradiente negativo del potencial:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (6)$$

Esta formulación resulta especialmente útil para visualizar campos conservativos y permite aplicar técnicas matemáticas avanzadas para resolver problemas complejos. Estos conceptos ofrecen un marco teórico sólido que permite interpretar los fenómenos electrostáticos desde un enfoque riguroso y coherente. Su aplicación se extiende desde el diseño de sistemas eléctricos hasta el análisis de materiales, la interacción de partículas y campos tecnológicos emergentes como la microelectrónica y la bioelectricidad.

III. METODOLOGÍA

El presente estudio adopta una metodología teórica-analógica de base científica, que integra rigurosamente los fundamentos de la física electromagnética con un marco conceptual ampliado centrado en los sentimientos humanos como sistemas complejos de interacción emocional. El objetivo no es reducir la complejidad afectiva a una ecuación, sino establecer un modelo estructural análogo que permita ilustrar, desde una perspectiva científica, cómo pueden representarse y visualizarse ciertas dinámicas emocionales a través del lenguaje formal de la física.

El punto de partida metodológico es el análisis detallado de las leyes fundamentales que rigen las

interacciones electrostáticas, en particular, La Ley de Coulomb y el Campo eléctrico generado por una carga puntual, como se nombraron anteriormente en las ecuaciones (1) y (3).

Estas expresiones se desarrollan desde un enfoque vectorial, considerando sistemas ideales en el vacío, sin intervención de medios dieléctricos ni efectos relativistas, con el propósito de mantener un modelo matemáticamente puro y didácticamente accesible.

La visualización de las líneas de campo y superficies equipotenciales se apoya en herramientas computacionales como *GeoGebra*, *Python* (bibliotecas *Matplotlib* y *NumPy*) o *Desmos*, para permitir una representación precisa de las dinámicas generadas por distintas configuraciones de carga.

De esta manera, se propone un modelo conceptual en el cual los sentimientos humanos son tratados como entidades que poseen una carga emocional, que puede variar en intensidad, dirección e influencia sobre otros individuos (Tabla 1). Se establece una correspondencia analógica entre las variables físicas y los componentes emocionales del comportamiento humano.

Tabla 1. Analogía de las variables

Componente físico	Interpretación emocional análoga
Carga eléctrica (q)	Intensidad emocional (positiva, neutra o negativa)
Campo eléctrico ($\vec{E}$)	Influencia emocional de un individuo en su entorno
Fuerza eléctrica ($\vec{F}$)	Impacto emocional entre personas
Distancia (r)	Grado de cercanía o lejanía emocional
Constante (k_e)	Medio o contexto psicosocial que modula la interacción
Superposición de campos	Confluencia de múltiples emociones (ambientes complejos)

Fuente: Elaboración propia.

Se recurre al enfoque de modelación analógica estructural, ampliamente empleado en educación científica, para evaluar la validez y coherencia de la transferencia de significado entre dominios. La propuesta no intenta establecer una equivalencia exacta entre fenómenos físicos y emocionales, sino una representación simbólica rigurosamente articulada que permita visualizar, explicar y reflexionar sobre las relaciones entre las personas desde un marco lógico-formal.

Criterios de validación estructural:

- *Coherencia interna:* las relaciones matemáticas se conservan en la estructura del modelo analógico.
- *Potencial educativo:* la analogía puede emplearse en enseñanza media o superior como recurso interdisciplinario.
- *Rigor epistemológico:* se mantiene una clara distinción entre la representación metafórica y la realidad física.

Limitaciones:

- Los sentimientos humanos no pueden cuantificarse en unidades físicas.
- La dirección e intensidad emocional no responden a leyes deterministas.
- El modelo es una herramienta de ilustración conceptual, no predictiva.

Herramientas y recursos:

- *Simulación matemática de campos:* Python, GeoGebra, MATLAB.
- *Diagramas de líneas de influencia emocional:* ilustraciones vectoriales inspiradas en campos eléctricos.
- *Esquemas comparativos:* tablas estructuradas para analogía variable por variable.
- *Revisión bibliográfica:* teoría de campos, modelación análoga y pedagogía conceptual.

IV. RESULTADOS

La aplicación de la analogía entre el comportamiento de las cargas eléctricas y la dinámica de los sentimientos humanos ha permitido establecer un modelo conceptual que visualiza y explica ciertas interacciones emocionales a través de principios de la electrostática. A continuación, se presentan los resultados en tres niveles: (1) modelación teórica, (2) visualización gráfica y (3) análisis interpretativo del sistema emocional.

A partir de la Ley de Coulomb (1), se definió una función emocional teórica, donde la fuerza emocional es $\vec{F}_e$, entre dos individuos con intensidades emocionales representadas por i_1 e i_2 , separadas por una distancia emocional r y, finalmente, la constante k_e , que actúa como coeficiente simbólico que representa el contexto psicosocial (ambiente familiar, laboral o escolar):

$$\vec{F}_e = k_e \frac{i_1 i_2}{r^2} \hat{r} \quad (7)$$

Este modelo refleja que los sentimientos intensos (altos valores de i) generan mayor influencia, mientras que las interacciones emocionales disminuyen con la distancia afectiva. Además, el entorno puede amplificar o amortiguar las interacciones, representado simbólicamente por el valor de k_e .

La Figura 1 representa una configuración grupal en la que múltiples individuos emiten influencias emocionales simultáneamente, modeladas como cargas positivas (azul) y negativas (rojo). Las líneas amarillas representan los campos emocionales generados por cada individuo, mientras que las líneas punteadas grises indican las regiones donde estos campos se cruzan, combinan o neutralizan parcialmente.

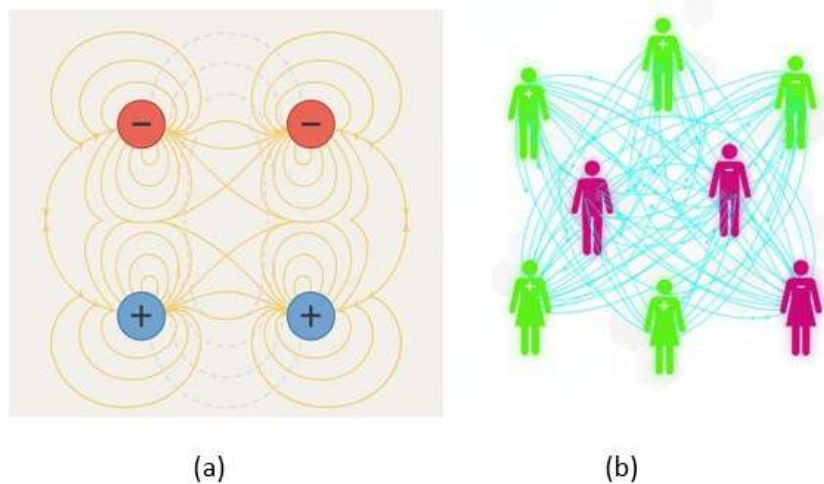


Fig. 1. Analogía del campo eléctrico, (a) Interacción entre cargas (b) interacción entre personas.

Las *cargas positivas* representan personas con sentimientos positivos (afecto, entusiasmo, esperanza), mientras que las *cargas negativas* representan personas con sentimientos emocionalmente difíciles (tristeza, ansiedad, enojo). Estas se visualizan unidas por líneas análogas a las de campo eléctrico (Ley de Coulomb), cuyas flechas *no* indican "atracción entre iguales", sino *influencias cruzadas* de sus campos emocionales en el entorno grupal.

Desde la perspectiva física, el *principio de superposición de campos* establece que, en cualquier punto del espacio, el campo total es la suma vectorial de los campos generados por cada carga. Aplicado al ámbito emocional, esto implica que en contextos grupales —como equipos de trabajo, aulas o entornos familiares— las influencias emocionales individuales no actúan de forma aislada, sino que se combinan, generando *zonas de refuerzo emocional* (cuando las cargas tienen el mismo signo e intensifican el entorno) o *zonas de interferencia emocional* (cuando las cargas son opuestas y sus efectos se neutralizan parcial o totalmente). Formalmente:

$$\vec{E}_{\text{total}}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i(\mathbf{r}), \quad (8)$$

donde cada $\vec{E}_i$ representa la *influencia emocional* análoga al campo generado por la i -ésima “carga afectiva”.

Este modelo permite visualizar cómo un entorno social puede volverse emocionalmente denso, armonioso o caótico, dependiendo de la *distribución*, *magnitud* y *polaridad* de las emociones individuales. No se trata de atracción entre iguales, sino de cómo la combinación de influencias simultáneas modifica el entorno afectivo en el que todos interactúan.

A. Simulaciones en Python para evaluar la interacción entre cargas (emociones)

En la Figura 2 se muestra el código en *Python* utilizado para hacer la analogía entre interacciones emocionales y la superposición de campos eléctricos generados por cargas puntuales. Se normaliza la constante de Coulomb a $k = 1$ para facilitar la interpretación cualitativa. Las cargas positivas y negativas representan emociones de distinta polaridad y su influencia en el entorno.

```
Evaluación Ley de Coulomb

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Crear malla XY
x = np.linspace(-5, 5, 50)
y = np.linspace(-5, 5, 50)
X, Y = np.meshgrid(x, y)

# Definir cargas emocionales: (x, y, q)
cargas = [(-2, -2, 1.0), (2, -2, -1.0), (-2, 2, -1.0), (2, 2, 1.0)]
Ex, Ey = np.zeros_like(X), np.zeros_like(Y)

# Constante de Coulomb normalizada
k = 1

# Superposición del campo de cada carga
for (xq, yq, q) in cargas:
    dx, dy = X - xq, Y - yq
    r2 = dx**2 + dy**2
    r2[r2 == 0] = 1e-20
    r = np.sqrt(r2)
    Ex += k * q * dx / r2 / r
    Ey += k * q * dy / r2 / r

# Visualización del campo
E = np.sqrt(Ex**2 + Ey**2)
plt.figure(figsize=(6, 6))
plt.streamplot(X, Y, Ex, Ey, color=E, cmap='coolwarm',
density=1.2)
plt.scatter(*zip(*[(x, y) for x, y, _ in cargas]),
            c=['red' if q > 0 else 'blue' for _, q in cargas],
            s=80)
plt.axis('equal')
plt.title("Campo eléctrico emocional (modelo vectorial)")
plt.show()
```

Fig. 2. Código de aplicación de la Ley de Coulomb.

La Figura 3 representa una simulación computacional del campo emocional grupal, utilizando la analogía electromagnética basada en la Ley de Coulomb. En esta configuración, se modelaron cuatro individuos ubicados estratégicamente: dos con carga emocional positiva (marcados con cruces rojas) y dos con carga emocional negativa (marcados con cruces azules). Las líneas de flujo indican la dirección del campo emocional en cada punto del plano, mientras que el color de fondo representa la intensidad del campo, según la escala adyacente.

El patrón de líneas sugiere zonas de mayor influencia emocional, donde la interacción de cargas opuestas genera campos más intensos (atracción), y zonas donde cargas similares provocan repulsión, desorganizando el entorno emocional inmediato. Esta simulación permite observar cómo las emociones individuales se combinan y distribuyen espacialmente en un grupo, generando tensiones, afinidades o zonas neutras.

Además, el modelo sirve como herramienta pedagógica para reflexionar sobre la importancia del equilibrio emocional colectivo en contextos educativos, laborales o sociales. Su interpretación permite comprender que las dinámicas emocionales no actúan de manera aislada, sino que se superponen, modulando el “campo afectivo” compartido dentro de los grupos humanos.

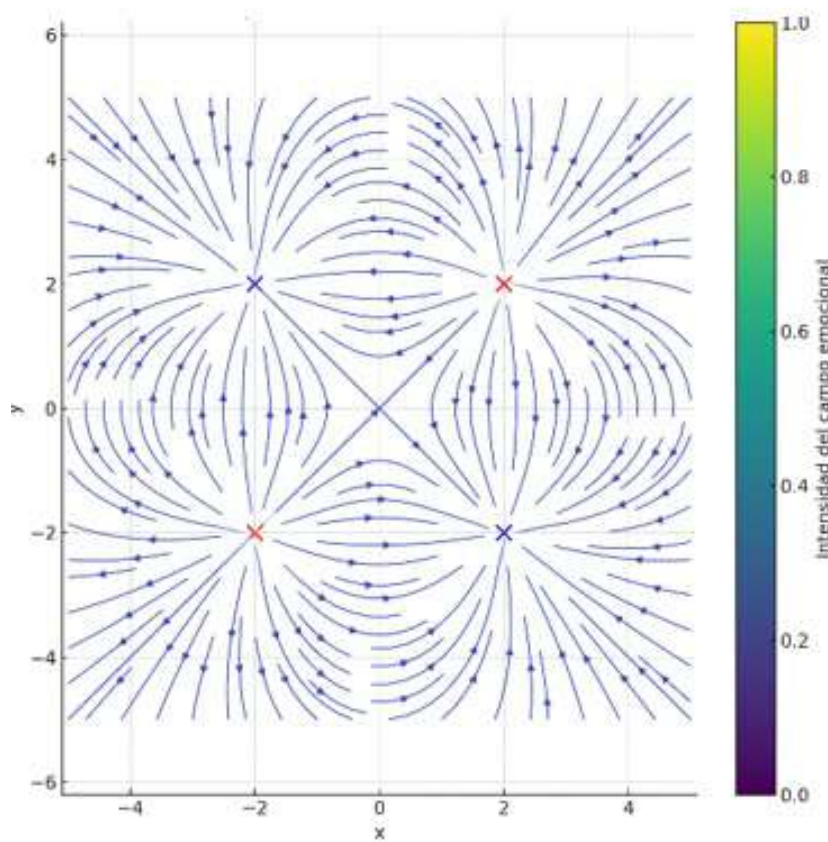


Fig. 3. Simulación del campo eléctrico emocional en una configuración grupal (modelo vectorial).

La Tabla 2 resume las principales configuraciones analizadas en la simulación del campo eléctrico emocional, utilizando como base conceptual la analogía entre las cargas eléctricas y los estados emocionales de los individuos. Cada configuración representa una disposición particular de cargas emocionales positivas, negativas o neutras, interpretadas respectivamente como *afecto*, *tensión* o *indiferencia* en un entorno social.

Estas configuraciones fueron diseñadas para explorar distintos escenarios de interacción grupal, como relaciones armónicas (atracción entre cargas opuestas), conflictos emocionales (repulsión entre cargas del mismo signo) y zonas de neutralidad emocional (presencia de cargas cercanas a cero o equilibradas). La simulación permite visualizar cómo estas combinaciones afectan la distribución del campo emocional colectivo, facilitando el análisis de dinámicas como cohesión, aislamiento o polarización afectiva.

El propósito de este enfoque es ofrecer un modelo interpretativo que articule los principios de la física electromagnética con fenómenos emocionales cotidianos, permitiendo tanto una comprensión visual como una reflexión crítica sobre el impacto de las emociones individuales en el bienestar colectivo.

Tabla 2. Configuraciones de interacciones emocionales simuladas como cargas.

Caso	Carga A	Carga B	Naturaleza de la interacción	Interpretación emocional
1	+1	+1	Repulsión	Dos personas con alta emocionalidad positiva, pero con conflictos de egos; no logran trabajar juntas.
2	+1	-1	Atracción	Persona empática atraída por alguien en estado emocional negativo; se genera una conexión solidaria.
3	-1	-1	Repulsión	Dos personas con alta carga emocional negativa se rechazan o agravan su malestar.
4	+1	0	Neutro con atracción débil	Una persona entusiasta intenta motivar a alguien emocionalmente neutro.
5	0	0	Sin interacción	Estado de neutralidad emocional mutua.
6	+2	-2	Atracción intensa	Vínculo emocional muy fuerte: amor profundo, mentoría poderosa o dependencia.

El modelo propuesto permite observar, desde una analogía electromagnética, cómo la intensidad y el tipo de vínculo emocional dependen de la naturaleza de las *cargas emocionales* involucradas. Las cargas positivas simbolizan emociones expansivas como alegría, entusiasmo o afecto, mientras que las negativas representan estados como tristeza, ansiedad o frustración. Al aplicar la Ley de Coulomb, las emociones afines pero iguales tienden a repelerse si no hay regulación, mientras que emociones opuestas se atraen con fuerza, como ocurre en las dinámicas de ayuda, dependencia o empatía.

Esta visualización se enriquece cuando se introducen configuraciones múltiples. Por ejemplo, al simular un grupo con varios individuos cargados emocionalmente (*modelo grupal*), se puede observar la superposición vectorial del campo emocional, donde ciertas zonas se vuelven emocionalmente más densas o conflictivas, y otras más armoniosas o estables. Esto sugiere que el bienestar grupal puede modelarse también como un equilibrio de cargas emocionales, donde el rol de líderes o figuras neutras (carga 0) puede ser estabilizador.

Así, el campo emocional simulado se convierte en una herramienta visual y analítica para comprender relaciones interpersonales complejas, aportando no solo al aprendizaje de conceptos físicos, sino también al desarrollo emocional y social de los estudiantes.

B. Discusión de resultados

En la simulación del campo emocional, las interacciones entre cargas emocionales revelan patrones coherentes con la analogía propuesta: cargas de igual signo generan zonas de repulsión, mientras que cargas opuestas inducen zonas de atracción, y las cargas de magnitud neutra o moderada modulan el campo global. La superposición de campos, evidenciada en las figuras gráficas, permite identificar zonas de refuerzo emocional, interferencia o neutralidad. Esta validación visual complementa la tipificación cualitativa dada en la Tabla 2.

El uso de analogías estructurales en la enseñanza de conceptos científicos ha sido respaldado por la literatura académica. Brown y Salter sostienen que las analogías son un recurso pedagógico esencial, aunque advierten sobre posibles malinterpretaciones si no se explicitan sus límites [1]. Chou observa que las metáforas y analogías ayudan a formar modelos mentales que facilitan la comprensión de conceptos no observables, como campos, fuerzas y relaciones implícitas [2]. Nuestro enfoque sigue ese lineamiento, proponiendo una analogía estructural entre el dominio electromagnético (base) y el dominio emocional (objetivo), conforme a la teoría del *structure-mapping* de Gentner [3].

La analogía del campo emocional resuena con las ideas clásicas de la teoría de campo social: Kurt Lewin propuso que el comportamiento humano es función del individuo y su entorno ($B = f(P, E)$) [4]. En su *Teoría de Campo*, los “espacios de fuerza” representan tensiones psicológicas que guían la conducta [5]. Nuestra metáfora formaliza esa intuición mediante ecuaciones vectoriales y visualizaciones de campo. Revisiones modernas de la teoría de campo reconocen que, aunque su rigor ha sido cuestionado,

sigue siendo útil como lente conceptual para entender dinámicas grupales [6].

Modelos de emoción computacional también respaldan la idea de *campos de influencia emocional*. Schweitzer y García desarrollaron un modelo multiagente en comunidades en línea donde se genera un campo informativo emocional que retroalimenta los estados emocionales de los agentes [7]. Aunque su escala y mecanismos difieren del presente trabajo, el principio de propagación y retroalimentación emocional como campo es compartido. De modo similar, Ambrosio propone una descripción matemática de las emociones como ondas electromagnéticas para cuantificar su intensidad y naturaleza [8], lo cual se alinea con nuestra simulación de campos emocionales mediante cargas.

Los patrones de superposición observados en nuestra simulación, zonas donde campos de cargas opuestas se neutralizan parcial o totalmente, evocan fenómenos de *interferencia emocional*, similares a los comportamientos emergentes en comunidades humanas complejas. Este tipo de “cancelación emocional” puede entenderse como mecanismo de regulación grupal o mediación. En el ámbito educativo, la analogía puede servir como herramienta para que los estudiantes visualicen cómo múltiples influencias afectivas pueden converger, reforzarse o contrarrestarse.

No obstante, la analogía tiene sus límites. Como advierte Brown, los estudiantes pueden extrapolar excesivamente y aplicar la analogía más allá de su dominio válido [1]. De forma análoga, Guerra-Ramos muestra que la efectividad de las analogías depende de cómo se presenten y de la participación activa de los estudiantes en el mapeo de relaciones, no solo del paralelismo superficial [9]. Por ello, es esencial aclarar que este modelo no pretende cuantificar emociones reales ni sustituir teorías psicológicas, sino servir como marco interpretativo simbólico.

Además, teorías contemporáneas de la emoción ofrecen perspectivas críticas. Barrett propone la *teoría de la emoción construida*, según la cual las emociones no son entidades fijas, sino construcciones predictivas del cerebro basadas en afecto continuo y conceptos culturales [10]. Esto implica que no se pueden asignar valores emocionales absolutos (como una carga q) sin considerar el contexto, la cultura y la variabilidad individual. En consecuencia, la analogía aquí planteada es una simplificación intencional con fines explicativos.

Otra limitación es la ausencia de validación empírica directa. Sería valioso que estudios futuros confrontaran los campos simulados con datos emocionales reales recogidos mediante cuestionarios, sensores fisiológicos o métricas subjetivas. Esta validación cruzada podría ajustar magnitudes, polaridades o distribución espacial del modelo emocional.

En síntesis, los resultados apoyan la hipótesis de que la estructura formal del campo eléctrico puede servir como analogía plausible para conceptualizar dinámicas emocionales grupales. Las figuras de líneas de campo complementan la tipificación cualitativa de la Tabla 2, y los patrones de interacción simulados reflejan fenómenos intuitivos de atracción, repulsión y neutralidad emocional. Si bien el modelo es simbólico y no pretende reemplazar teorías psicológicas, ofrece una herramienta poderosa de visualización y reflexión para el cruce entre ciencia, emoción y educación.

CONCLUSIONES

El análisis realizado confirma que la estructura formal del campo eléctrico y la Ley de Coulomb permiten modelar, de manera rigurosa y significativa, la dinámica de los sentimientos humanos en contextos individuales y colectivos. A través de una analogía cuidadosamente construida, se ha demostrado que los sentimientos, entendidos como manifestaciones afectivas de diferente intensidad y dirección, pueden representarse simbólicamente como cargas emocionales capaces de influir en su entorno, generando campos cuya interacción obedece principios estructuralmente análogos a los de la física electromagnética.

La intensidad del sentimiento se representa eficazmente mediante la magnitud de la carga emocional, y el grado de proximidad entre personas determina la fuerza con la que dichos sentimientos se manifiestan mutuamente, tal como lo establece la relación inversa al cuadrado de la distancia en la Ley de Coulomb. Del mismo modo, el entorno actúa como un medio modulador que puede amplificar o atenuar los efectos de estas interacciones emocionales, revelando la importancia del contexto psicosocial en el comportamiento afectivo. El principio de superposición de campos permite interpretar, con precisión conceptual, fenómenos como la armonía emocional grupal, los climas afectivos colectivos y las interferencias entre sentimientos opuestos.

Los diagramas contruidos y las simulaciones gráficas aportan evidencia visual que refuerza el valor explicativo del modelo, permitiendo observar de forma clara las zonas de atracción emocional, influencia afectiva, equilibrio o conflicto. Esta propuesta, lejos de trivializar la ciencia o los sentimientos, reafirma que el lenguaje formal de la física es capaz de trascender su dominio tradicional para ofrecer marcos interpretativos sólidos y estéticamente poderosos.

Se confirma que la modelación de los sentimientos humanos desde la teoría del campo eléctrico no solo es posible, sino que enriquece el diálogo entre ciencia, emoción y pedagogía. Este enfoque constituye una herramienta interdisciplinaria valiosa, tanto para la enseñanza significativa de conceptos físicos como para la exploración de nuevas formas de representar y comprender las dinámicas emocionales en los sistemas humanos.

REFERENCIAS

- [1] S. Brown and S. Salter, "Analogies in science and science teaching," *Advances in Physiology Education*, vol. 34, no. 4, pp. 167–169, 2010.
- [2] A. Chou, "Using analogies to explain versus inspire concepts," *AI EDAM*, 2015.
- [3] D. Gentner, "Structure-mapping: A theoretical framework for analogy," *Cognitive Science*, vol. 7, no. 2, pp. 155–170, 1983.
- [4] K. Lewin, *Principles of Topological Psychology*. New York: McGraw-Hill, 1936.
- [5] —, "Field theory and experiment in social psychology," *American Journal of Sociology*, vol. 44, pp. 868–896, 1939.
- [6] B. Kump et al., "Lewin's field theory as a lens for understanding incumbent actors' agency in sustainability transitions," *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 2023.
- [7] F. Schweitzer and D. García, "An agent-based model of collective emotions in online communities," *arXiv preprint arXiv:1008.4053*, 2010. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1008.4053>
- [8] B. Ambrosio, "Beyond the brain: towards a mathematical modeling of emotions," *arXiv preprint arXiv:2006.15508*, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2006.15508>
- [9] M. T. Guerra-Ramos, "Analogies as tools for meaning making in elementary science education," *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, vol. 7, no. 1, pp. 29–39, 2011.
- [10] L. F. Barrett, "The theory of constructed emotion: an active inference account of interoception and categorization," *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, vol. 12, no. 1, pp. 1–23, 2017.

Mantenimiento preventivo y predictivo en centrales telefónicas: revisión teórica

Dirxon Javier Muñoz Pinto*
<https://orcid.org/0009-0005-6996-7353>
dmunoz@ivic.gob.ve
Instituto Venezolano de Investigaciones
Científicas
Mérida, Venezuela

Dirwin Alfonzo Muñoz Pinto*
<https://orcid.org/0000-0002-2400-9064>
dirwin.munoz@isfodosu.edu.do
Instituto Superior de Formación Docente
Salomé Ureña
Santiago de los Caballeros, República Dominicana

*Autor de correspondencia: dirwin.munoz@isfodosu.edu.do

Recibido (21/06/2025), Aceptado (03/09/2025)

Resumen. En este estudio se realiza una revisión bibliográfica en la región Latinoamericana bajo el método PRISMA, para analizar estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo aplicadas a centrales telefónicas híbridas. La búsqueda inicial en bases de datos académicas identificó 1034 trabajos, filtrándose a 17 estudios mediante criterios rigurosos. Los resultados destacan que el mantenimiento preventivo, basado en inspecciones programadas, corrige deficiencias de forma anticipada, asegurando la continuidad del servicio y optimizando el rendimiento del sistema. Mientras que, el mantenimiento predictivo, apoyado en el monitoreo en tiempo real y el análisis de datos, identifica anomalías y fallos potenciales antes de que se manifiesten. Este enfoque prolonga la vida útil del equipo y minimiza las intervenciones correctivas, que son costosas y afectan la continuidad operativa. Se concluye que la integración de estas estrategias, son complementarias para garantizar un funcionamiento eficiente, planificar intervenciones en momentos óptimos y favorecer la operación sostenible y rentable de las centrales telefónicas híbridas.

Palabras clave: mantenimiento preventivo, mantenimiento predictivo, red telefónica, sistemas híbridos.

Preventive and Predictive Maintenance in Telephone Exchanges: Theoretical Review

Abstract. This study presents a bibliographic review conducted in Latin America using the PRISMA methodology to analyze preventive and predictive maintenance strategies applied to hybrid telephone exchanges. An initial search in academic databases yielded 1,034 records, which were narrowed down to 17 studies through rigorous inclusion criteria. The findings emphasize that preventive maintenance, based on scheduled inspections, addresses deficiencies in advance, ensuring service continuity and enhancing system performance. Predictive maintenance, supported by real-time monitoring and data analysis, identifies anomalies and potential failures before they occur. This approach extends equipment lifespan and reduces the need for corrective interventions, which are typically costly and disruptive. It is concluded that these maintenance strategies are complementary and, when integrated, contribute to efficient operation, optimal planning of interventions, and the sustainable and cost-effective management of hybrid telephone exchange systems.

Keywords: preventive maintenance, predictive maintenance, telephone network, hybrid systems.

I. INTRODUCCIÓN

El teléfono, concebido inicialmente para transmitir voz, ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta multifuncional que conecta no sólo personas, sino también ordenadores y sistemas complejos [1]. A lo largo del tiempo, han surgido redes locales, conexiones de datos a larga distancia mediante enlaces satelitales y telefonía móvil, configurando un ecosistema de telecomunicaciones en constante transformación [2]. En este contexto, las centrales telefónicas, tanto locales como remotas, constituyen el núcleo de la infraestructura, actuando como el “centro de control” encargado de establecer y dirigir el flujo de llamadas. Entre ellas, las centrales telefónicas híbridas, que integran funcionalidades analógicas y digitales, permiten la convivencia de la Red Telefónica Pública Conmutada (PSTN) y la telefonía por Protocolo de Internet (VoIP) [3], facilitando transiciones tecnológicas graduales y optimizando recursos.

El adecuado funcionamiento de estas centrales depende en gran medida de programas de mantenimiento, siendo el mantenimiento preventivo y el predictivo los pilares esenciales para minimizar el mantenimiento correctivo y garantizar la continuidad del servicio. No obstante, la experiencia práctica en entornos reales, como el Departamento de Telecomunicaciones de la Universidad de Los Andes – Venezuela, evidencia que la ausencia de planes estructurados y automatizados de mantenimiento, sumada a la carencia de capacitación técnica, propicia fallas recurrentes y disminuye la eficiencia operativa.

Diversos estudios coinciden en señalar la importancia de diferenciar las clases de mantenimiento dentro de la gestión logística e industrial [3]. Por ejemplo, Solano y Fuentes describen que, en este ámbito, se reconocen modalidades como el mantenimiento preventivo, orientado a garantizar el adecuado funcionamiento de los activos y a disminuir la probabilidad de fallas [4]-[5]. Asimismo, se consideran el mantenimiento predictivo, programado e integral. A su vez, se contempla el mantenimiento correctivo, el cual se aplica únicamente tras la ocurrencia de una avería y busca restablecer el sistema a un nivel óptimo de desempeño. Esta tipología permite comprender que la efectividad de los procesos depende no solo de la corrección de fallas, sino de la anticipación y planificación que minimicen los riesgos.

En concordancia con Medina [5], al analizar el contexto de la industria petrolera del estado Zulia en Venezuela, se evidenció una tendencia marcada hacia la aplicación del mantenimiento correctivo. Esta situación revela deficiencias en las inspecciones de equipos y un uso limitado de estrategias que permitirían prever fallas con mayor precisión. La escasa implementación del mantenimiento predictivo y la débil presencia del preventivo incrementan la vulnerabilidad operativa, lo cual reduce las posibilidades de diagnóstico temprano y, en consecuencia, compromete la continuidad de la producción.

Guzmán y Aldana [6], resaltan la necesidad de un plan global que permita organizar de manera eficiente cada aspecto relacionado con la infraestructura de telecomunicaciones. Este plan incluye la adecuada disposición del cableado estructurado, el mantenimiento periódico de los armarios y la atención preventiva a los dispositivos de telecomunicaciones, con el propósito de evitar interrupciones o fallos derivados del deterioro del sistema. En esa misma línea, Hernández [7], enfatiza la relevancia de los mantenimientos preventivos y predictivos, incorporando herramientas tecnológicas como la cámara termográfica. Esta facilita la identificación de anomalías térmicas en componentes eléctricos sin necesidad de contacto físico. Esta técnica, al generar termogramas que evidencian puntos calientes y variaciones de temperatura, contribuye significativamente a la planificación del mantenimiento y reduce la probabilidad de fallas inesperadas. Ambas investigaciones coinciden en que la implementación sistemática de estas estrategias incrementa la confiabilidad de los sistemas, ya sea en telecomunicaciones o en otros ámbitos empresariales, subrayando el valor universal del mantenimiento preventivo y predictivo.

De esta manera, el mantenimiento en la ingeniería moderna ha trascendido su función tradicional de simplemente reparar fallos a una visión más preventiva y con proyecciones futuras claras. Hoy en día, el mantenimiento es una disciplina estratégica, esencial para garantizar la disponibilidad, fiabilidad y vida útil de equipos e instalaciones, a la vez que se optimizan los costes de operación a largo plazo [8]. Esta evolución es particularmente crítica en el sector de las telecomunicaciones, donde la continuidad del servicio es un pilar fundamental para la operatividad de las centrales telefónicas.

II. DESARROLLO

A pesar de esta relevancia, existe una brecha notable en la cultura del mantenimiento, especialmente en el ámbito de la educación y en países en desarrollo. Como señala Suarez [9], es común observar una falta de competencias en el manejo y la conservación de equipos informáticos, más allá de su

uso habitual. Esta deficiencia se debe, en gran medida, a la ausencia de programas establecidos de mantenimiento preventivo-correctivo y a un estereotipo cultural que relega estas tareas exclusivamente a especialistas técnicos. Esta situación no solo afecta a los equipos, sino que también limita el desarrollo tecnológico y educativo en general.

La necesidad de implementar planes de mantenimiento rigurosos no se limita únicamente al sector educativo. En la industria de la comunicación, la falta de rutinas de mantenimiento conduce a que los equipos operen en condiciones subóptimas durante períodos prolongados, lo que acorta su vida útil y afecta su rendimiento. Un ejemplo de esto se observa en el trabajo de Barrios [10], quien destaca que muchas empresas que utilizan tableros eléctricos para el arranque de motores no cuentan con programas de mantenimiento. La implementación de un plan de mantenimiento preventivo, como el que él propone, no solo extiende la durabilidad de los equipos, sino que también optimiza su desempeño operativo.

Dentro de este panorama evolutivo, el mantenimiento predictivo ha emergido como una herramienta clave para optimizar la gestión de activos. Esta estrategia, como se destaca en la investigación de Sereviche [11], demuestra que las necesidades técnicas de cada cliente en su subestación eléctrica se lograron suplir mediante la aplicación combinada del mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo de las subestaciones.

Con el tiempo, la percepción del mantenimiento ha evolucionado de un simple conjunto de acciones correctivas a una ideología estratégica orientada a prolongar la vida útil de los equipos y aumentar su disponibilidad. Este cambio de paradigma, abordado por Bogotá y Galván [12], busca reducir los tiempos de inoperatividad y los costos asociados a fallos imprevistos. En este marco, el mantenimiento preventivo es una pieza central, definiéndose como la ejecución de actividades planificadas periódicamente con el objetivo de optimizar el rendimiento de los equipos y garantizar la continuidad del servicio.

La transición de un modelo de mantenimiento reactivo a uno proactivo no ha sido accidental; es una consecuencia directa de las revoluciones industriales y de las crecientes exigencias de los sistemas productivos. Como detalla Díaz [13], a mediados del siglo XX el mantenimiento se limitaba a intervenciones correctivas que solo se realizaban al detectar una falla. No fue hasta los años setenta que la necesidad de aumentar la vida útil, fiabilidad y disponibilidad de los activos a un costo mínimo impulsó el desarrollo del mantenimiento preventivo. Este conjunto de tareas planificadas no solo contrarresta los fallos de los componentes, sino que también genera una mayor confiabilidad en el uso de las máquinas y contribuye a incrementar los niveles de producción, asegurando su funcionalidad durante su operación.

Para entender cómo se aplican estas estrategias, es fundamental tener claras las definiciones y los objetivos de cada tipo de mantenimiento. Según Rodríguez [14], durante el análisis de criticidad se deben determinar los niveles de prioridad operativa de los equipos (crítico, importante o prescindible) y establecer las tareas de mantenimiento correspondientes, en función del modelo de mantenimiento implementado. Para desarrollar el plan de mantenimiento, se recomienda evitar las listas de tareas muy extensas o detalladas. El exceso de detalle resulta impracticable y convierte el plan en un documento demasiado teórico, lo que compromete su correcta implementación.

Una gestión de mantenimiento efectiva no implica la aplicación universal de una única estrategia. La clave, como sugiere Barahona y Pasantez [15], reside en la adopción de un plan integral que asigne la estrategia de mantenimiento más adecuada (correctiva, preventiva o predictiva) a cada equipo, basándose en la importancia de su función dentro del proceso productivo.

Según Cano et al. [16], para lograr la efectividad del mantenimiento, se requiere la implementación de un sistema informático robusto que permita controlar y mejorar el estado de la flota. Esto debe ir acompañado de la integración de todo el personal (tanto operativo como directivo) mediante la comunicación de los beneficios del plan; además de la implementación de sistemas de gestión, calidad, políticas, objetivos, metas, y una buena planificación de los recursos humanos, técnicos, económicos y administrativos. Sin embargo, la programación de estas actividades requiere un cuidadoso equilibrio: un período de tiempo demasiado largo entre mantenimientos aumenta el riesgo de fallas, mientras que un intervalo excesivamente corto eleva los costos de manera innecesaria.

La implementación de un plan de mantenimiento estructurado va más allá de la teoría; se ha demostrado su eficacia en la mejora tangible de la operatividad y la eficiencia en entornos de alto riesgo. Un caso de estudio relevante es la implementación de un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para los equipos de telecomunicaciones de la Alcaldía de Florida, Valle [17]. Este plan no solo extendió la vida útil de dispositivos críticos como routers, switches y servidores, sino que

también mejoró significativamente la confiabilidad de las comunicaciones, optimizando así la prestación de servicios a la comunidad. De manera similar, Trujillo et al. [18] demostraron la necesidad de un plan estratégico de mantenimiento para el sistema de comunicaciones de un hospital, detallando la importancia de establecer objetivos claros, definir la periodicidad de las tareas y contar con manuales de procedimientos y registros de control.

No obstante, la ausencia de un plan adecuado genera consecuencias directas y severas. Tal como indican Álvarez et al. [19], la falta de una programación correcta puede llevar a que equipos importantes carezcan de las protecciones adecuadas, aumentando el riesgo de fallas. Esta problemática subraya la necesidad de que los planes de mantenimiento no solo busquen la eficiencia, sino que también cumplan con los requerimientos regulatorios y garanticen la calidad del servicio al cliente. Para enfrentar estos retos, resulta crucial la capacitación continua del personal técnico y la adopción de nuevas tecnologías, tal como se concluye en un estudio realizado en la zona sur de Perú [20], demostrando que el factor humano y la actualización tecnológica son componentes inseparables de una estrategia de mantenimiento exitosa en el sector de las telecomunicaciones.

Tomando en cuenta la problemática encontrada en el mantenimiento preventivo, se consideró prioritario profundizar en la literatura existente con el fin de identificar, analizar y sintetizar las estrategias, metodologías y experiencias previas relacionadas con el mantenimiento preventivo y predictivo en centrales telefónicas híbridas. Este paso previo resulta fundamental para ofrecer a los lectores una recopilación exhaustiva de trabajos similares, que sirva como referencia técnica y científica para futuras investigaciones.

III. METODOLOGÍA

Para garantizar la rigurosidad y transparencia del proceso, se optó por realizar una revisión sistemática en América Latina, siguiendo la metodología PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Este enfoque permite documentar de manera estructurada las etapas de identificación, selección, evaluación y síntesis de la información, asegurando que las conclusiones se basen en evidencia científica sólida y actualizada. De este modo, el presente artículo no solo expone el panorama de las prácticas de mantenimiento en centrales telefónicas híbridas, sino que también ofrece un marco metodológico replicable para futuras investigaciones en el área.

La estrategia de búsqueda se implementó en el buscador Google Académico y la base de datos académica Redalyc, utilizando ecuaciones bibliográficas diseñadas para abarcar términos clave relacionados con “*mantenimiento preventivo*”, “*mantenimiento predictivo*” y “*centrales telefónicas híbridas*”. En la fase de identificación, se obtuvieron inicialmente 1 034 registros.

Posteriormente, en la etapa de cribado, se eliminaron duplicados y se aplicaron criterios de exclusión como el año de publicación (priorizando los últimos cinco años), idioma (se incluyeron únicamente trabajos en español e inglés) y pertinencia temática (centrada en ingeniería de telecomunicaciones y gestión de mantenimiento).

En la fase de elegibilidad, se revisaron los textos completos para verificar su relevancia y calidad metodológica. Finalmente, en la etapa de inclusión, se seleccionaron 17 estudios que cumplieran con todos los criterios y que sirvieron como base para el análisis comparativo con el presente trabajo.

A. Proceso de selección

Tras la búsqueda inicial, se identificaron 1 034 registros (465 en Google Académico y 569 en REDALYC). En la primera fase de cribado, se eliminaron 520 registros por no pertenecer al área de Ingeniería, quedando 514 estudios para examen detallado. El proceso completo de búsqueda y selección se documentó en un diagrama de flujo, lo que permite visualizar de forma clara la depuración progresiva de los registros y la trazabilidad de las decisiones tomadas en cada etapa, como se muestra en la Figura 1.

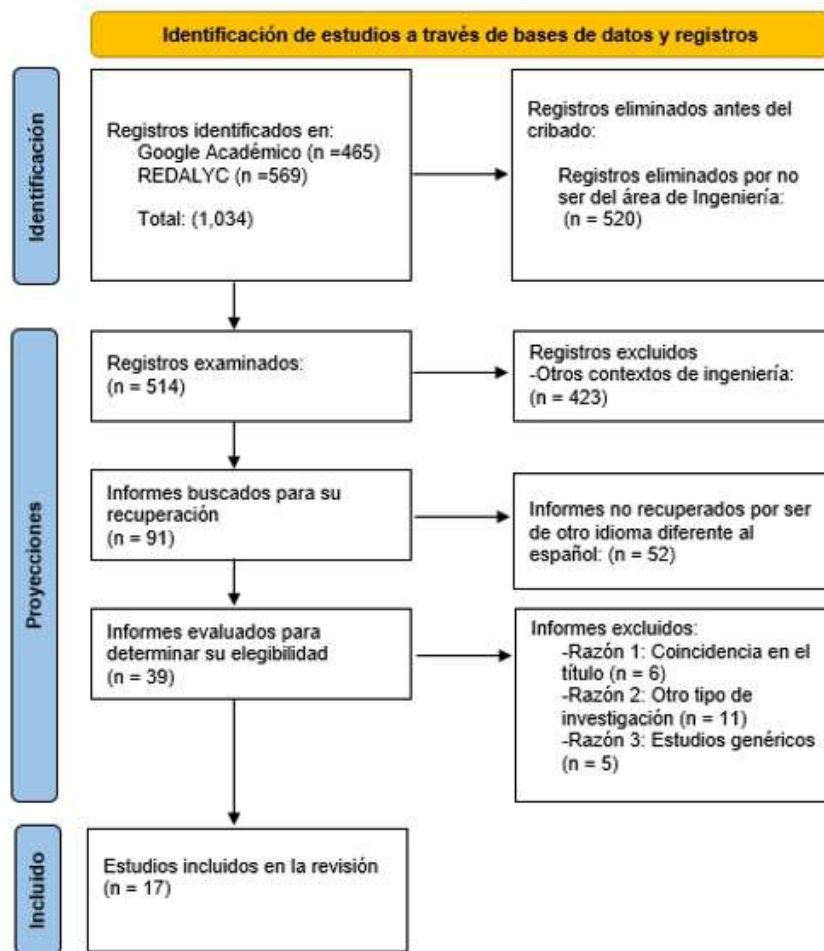


Fig. 1. Diagrama de trazabilidad de documentos.

IV. RESULTADOS

A. Distribución temporal de la revisión

En cuanto a la distribución temporal de los estudios seleccionados, se identificaron un total de 17 trabajos relevantes para los análisis correspondientes a los últimos cuatro años, tal como se presenta en la Figura 2.

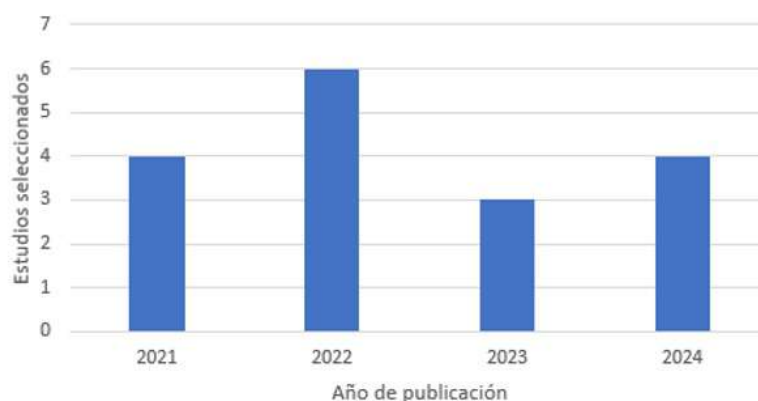


Fig. 2. Distribución de los estudios seleccionados por año.

B. Distribución geográfica

Desde la perspectiva regional, en la Tabla 1 se observa que Colombia y Perú concentran la mayor parte de los estudios, con un 41,17 % y un 29,41 %, respectivamente. Este resultado pone de manifiesto la relevancia que tiene en estos países la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo en empresas del sector de las telecomunicaciones. La aplicación de estos enfoques no solo contribuye a extender la vida útil de las maquinarias, sino que también garantiza la continuidad y eficiencia de los servicios, un aspecto crítico en una industria que demanda alta disponibilidad y confiabilidad en sus operaciones.

Tabla 1. Distribución geográfica de los trabajos bajo estudio

Países	Número de publicaciones	Referencia
Colombia	7	[4], [6], [11], [12], [16], [17], [19]
Ecuador	3	[7], [14], [15]
Guatemala	1	[10]
Perú	5	[8], [9], [13], [18], [20]
Venezuela	1	[5]
Total	17	

C. Caracterización

Una vez expuesta la distribución temporal y geográfica de los estudios considerados, resulta pertinente presentar de manera sistemática la información individual de cada documento. En la Tabla 2 se sintetizan los principales datos bibliográficos y las características más relevantes de los trabajos analizados, lo que permite disponer de un panorama estructurado del corpus bajo estudio y facilita la comprensión del alcance y diversidad de las investigaciones revisadas.

La información presentada en la tabla 2 permite evidenciar cómo, en los últimos años, se ha consolidado una línea de investigación y aplicación práctica centrada en el fortalecimiento del mantenimiento preventivo y predictivo en distintos contextos industriales, educativos y tecnológicos. Los estudios analizados no solo abarcan propuestas técnicas para sectores como telecomunicaciones, instalaciones eléctricas o subestaciones, sino que también destacan la incorporación de herramientas innovadoras como cámaras termográficas y algoritmos de aprendizaje automático para optimizar la detección de fallos y la planificación de intervenciones.

Además, algunos trabajos, como los de Suárez [9] y Ramos [8], abordan dimensiones formativas clave, revelando la necesidad de construir una cultura del mantenimiento desde el ámbito educativo y profesional. La convergencia entre propuestas técnicas, enfoques pedagógicos y aplicaciones inteligentes demuestra que el mantenimiento preventivo no debe considerarse únicamente como una medida de rutina, sino como una estrategia transversal capaz de mejorar la eficiencia operativa, prolongar la vida útil de los equipos y responder a necesidades concretas de cada entorno. En conjunto, estos aportes refuerzan el valor del mantenimiento como un eje estructural en la gestión moderna de activos.

Tabla 2. Descripción de los trabajos que conforman la revisión

Autores	Tipo de trabajo	Año	Aporte principal del estudio
Aldana y Guzmán [6]	Tesis (Tecnólogo)	2021	Proponen un plan global de intervención para cuartos de telecomunicaciones (TR), incluyendo disposición de cableado y mantenimiento estructurado.
Hernández [7]	Tesis (Ingeniero)	2021	Evalúa instalaciones eléctricas con enfoque en eficiencia energética; destaca uso de cámaras termográficas como herramienta para mantenimiento preventivo.
Suárez [9]	Tesis (Maestría)	2021	Propone un programa de mantenimiento preventivo-correctivo en el entorno educativo; identifica debilidades culturales y formativas en la gestión técnica.
Solano y Fuentes [4]	Artículo científico	2021	Estandariza procesos de mantenimiento en telecomunicaciones desde un enfoque logístico, estableciendo categorías claras de mantenimiento.
Álvarez, Lozano y Bravo [19]	Artículo científico	2022	Presentan una metodología predictiva basada en aprendizaje automático para transformadores de distribución, aplicable al monitoreo inteligente.
Barrios [10]	Tesis (Doctorado)	2022	Diseña un plan de mantenimiento preventivo para tableros de arranque, con énfasis en el uso de variadores de frecuencia.
Medina [5]	Artículo científico	2022	Describe el predominio del mantenimiento correctivo en la industria petrolera zuliana y sus impactos negativos; destaca la necesidad de planificación preventiva.
Ramos [8]	Tesis (Ingeniero)	2022	Desarrolla un aplicativo para enseñanza de mantenimiento preventivo, destacando su valor pedagógico en ingeniería de mantenimiento.
Severiche [11]	Tesis (Ingeniero)	2022	Aplica mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo a subestaciones eléctricas, demostrando cómo se suplen necesidades técnicas específicas del cliente.

Por otra parte, en la Tabla 3 se muestran otros estudios analizados que ofrecen un importante aporte

a la investigación, observándose que los planes de mantenimiento permiten la mejora significativa de los procesos productivos y evitan la inoperatividad ocasionada por fallas inesperadas.

Tabla 3. Otros estudios analizados

Autores	Tipo de trabajo	Año	Aporte principal del estudio
Trujillo, Chávez, Utrilla [18]	Artículo científico	2022	Desarrollan un plan estratégico de mantenimiento en hospitales, vinculando telecomunicaciones con operatividad y calidad de servicio.
Bogotá, Galván [12]	Tesis (Tecnólogo)	2023	Diseñan un plan preventivo para herramientas en una empresa industrial, reduciendo inoperatividad y mejorando rendimiento operativo.
Díaz [13]	Tesis (Ingeniero)	2023	Emplea distribución de Weibull para desarrollar plan de mantenimiento predictivo y preventivo en cargadores Volvo de uso industrial.
Rodríguez [14]	Tesis (Ingeniero)	2023	Propone un plan de mantenimiento vehicular para empresas de telecomunicaciones, clasificando equipos por niveles de criticidad.
Barahona, Pesántez [15]	Tesis (Ingeniero)	2024	Elaboran plan de mantenimiento en talleres de la industria molinera; ajustan estrategia (correctiva, preventiva o predictiva) a cada equipo según su función.
Cano, Achury, García [16]	Tesis (Tecnólogo)	2024	Integran sistema informático y recursos humanos para la implementación efectiva de un plan de mantenimiento; señalan la importancia de la planificación de recursos.
Díaz [20]	Tesis (Ingeniero)	2024	Muestra cómo la falta de capacitación y actualización tecnológica compromete el mantenimiento en telecomunicaciones; analiza sistemas de microondas y radiofrecuencia.
Riascos [17]	Tesis (Ingeniero)	2024	Implementa un plan de mantenimiento preventivo y correctivo en una alcaldía; mejora confiabilidad de equipos de telecomunicaciones y servicios comunitarios.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, la revisión permitió identificar un total de 17 trabajos relevantes, publicados en los últimos cuatro años, lo que refleja un creciente interés por el estudio del mantenimiento preventivo y predictivo en el sector de las telecomunicaciones.

En términos metodológicos, los trabajos revisados incluyen tanto tesis de grado y posgrado como artículos en revistas indexadas, lo que muestra un esfuerzo académico por abordar el tema desde diferentes niveles de formación e investigación. Este hallazgo refuerza la idea de que el mantenimiento preventivo y predictivo no solo es un asunto técnico, sino también un campo de estudio en expansión que integra enfoques educativos, investigativos y prácticos.

En síntesis, la literatura consultada valida la transición de un mantenimiento reactivo a uno proactivo y estratégico, resaltando la importancia de planes detallados, la monitorización constante de equipos y la continua formación del personal. Sin embargo, a pesar de los avances y de la evidencia de su éxito en otros sectores, existe un vacío de conocimiento en la aplicación específica y la validación de estas estrategias en el contexto de las centrales telefónicas híbridas. Por lo tanto, esta revisión teórica se justifica por la necesidad de analizar y consolidar la literatura gris disponible en el contexto latinoamericano. Su objetivo fue proponer un marco de referencia basado en los esfuerzos regionales para optimizar la fiabilidad y disponibilidad de estos sistemas críticos de telecomunicaciones.

Más allá del análisis técnico de los documentos, esta revisión teórica revela un patrón significativo en la bibliografía regional. La predominancia de tesis en el corpus evidencia una brecha de visibilidad y acceso al conocimiento en el área, ya que estos trabajos, a pesar de su calidad y aporte local, tienen un alcance limitado en comparación con las publicaciones indexadas. Este patrón nos permite diagnosticar que gran parte del conocimiento aplicado en el mantenimiento de sistemas críticos se encuentra estancado en la literatura gris.

Por lo tanto, una dirección para futuras investigaciones debe centrarse en la validación y ampliación del marco de referencia propuesto. Específicamente, sería de gran interés:

1. Explorar la aplicabilidad del marco en distintos contextos de telecomunicaciones en la región.
2. Desarrollar herramientas automatizadas que permitan la gestión de tareas de mantenimiento basadas en los principios teóricos consolidados en esta revisión.
3. Realizar estudios comparativos que contrasten la eficacia del marco propuesto con los estándares internacionales de mantenimiento predictivo, evaluando su desempeño en infraestructuras latinoamericanas.

Además, debe promoverse la capacitación necesaria para que los trabajos industriales tengan un alcance en las publicaciones científicas y se puedan destacar los trabajos de tan alta relevancia que suelen surgir en el sector industrial, de manera que se extienda la visión de tesis a un sentido más propio de la investigación científica.

REFERENCIAS

- [1] A. A. Huurdeman, *The worldwide history of telecommunications*. John Wiley & Sons, 2003.
- [2] J. M. Barceló, J. Iñigo, R. Martí, E. Peig, and X. Perramon, *Redes de Computadoras*, 1st ed. Barcelona: Eureka Media SL, 2004.
- [3] V. E. Álvarez and C. I. Ortega, "Vao ip la revolución de las redes telefónicas," Tesis Ingeniero, Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar, 2003. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12585/1529>
- [4] M. M. Solano and E. A. Fuentes, "Estandarizar el proceso de mantenimiento del área de logística en dico telecomunicaciones s. a. para las actividades que necesitan control y trazabilidad," *Revista de Ingenierías Interfaces*, vol. 4, no. 2, pp. 1–15, 2021. [Online]. Available: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/interfaces/article/view/8620>
- [5] R. Medina, "Tipos de mantenimiento en las unidades de medición de producción de pozos petroleros," *Revista Enfoques*, vol. 6, no. 21, pp. 37–49, 2022.

- [6] I. A. Guzmán and L. K. Aldana, "Plan global de intervención para los cuartos de telecomunicaciones (tr) de la red de datos udnnet," Tesis Tecnólogo, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2021. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11349/27916>
- [7] K. D. Hernández, "Diagnóstico y evaluación de las instalaciones eléctricas en la empresa de servicios en tecnología y telecomunicaciones woden ecuador sa con criterios de eficiencia energética," Tesis Ingeniero, Escuela Politécnica Nacional, 2021, facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21616>
- [8] J. G. Ramos, "Diseño de un aplicativo de mantenimiento preventivo para un aprendizaje activo en el curso ingeniería de mantenimiento de la fime – unprg," Tesis Ingeniero, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2022, facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12893/10891>
- [9] S. Suarez, "Programa de mantenimiento preventivo – correctivo para la calidad de servicio de los equipos informáticos en maestría de la une sede comas – 2018," Tesis Maestría, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, 2021. [Online]. Available: <https://repositorio.une.edu.pe/handle/20.500.14039/5430>
- [10] J. D. Barrios, "Diseño de investigación para un plan de mantenimiento preventivo para tableros de arranque de motores eléctricos con variador de frecuencia," Ph.D. dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2022. [Online]. Available: <https://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>
- [11] A. I. Sereviche, "Mantenimiento a subestaciones eléctricas de los grandes clientes de epm ejecutado por la empresa enetel sas," Tesis Ingeniero, Universidad de Antioquia, 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10495/26170>
- [12] M. C. Bogotá and A. F. Galván, "Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para los equipos y herramientas en dimancol group sas," Tesis Tecnólogo, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2023. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11349/35189>
- [13] A. A. Díaz, "Propuesta de un plan de mantenimiento predictivo y preventivo mediante la distribución de weibull a cargadores volvo 160f de la empresa agroindustrial laredo s.a.a," Tesis Ingeniero, Universidad Nacional de Trujillo, 2023, facultad de Ingeniería. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.14414/18755>
- [14] G. A. Rodríguez, "Diseño de un plan de mantenimiento de la flota vehicular para una empresa de servicio de telecomunicaciones," Tesis Ingeniero, Universidad Tecnológica Indoamérica, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.uti.edu.ec/handle/123456789/5546>
- [15] A. C. Barahona and L. E. Pasantez, "Elaboración de un plan de mantenimiento en el área de talleres de la industria molinera," Tesis Ingeniero, Universidad Politécnica Salesiana, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28974>
- [16] J. E. Cano, J. A. García, and M. A. Achury, "Propuesta sobre plan de mantenimiento para la empresa comfica," Tesis Tecnólogo, Universidad ECCI, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/4243>
- [17] J. J. Riascos, "Implementar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para reducir las continuas fallas que presentan los equipos de telecomunicaciones y equipos de medición eléctrica de la alcaldía municipal de florida," Tesis Ingeniero, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2024. [Online]. Available: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/65564>

- [18] G. Trujillo, W. Chávez, and D. Utrilla, "Implementación de un plan estratégico de mantenimiento del sistema de telecomunicaciones y su relación con la operatividad de un hospital regional," *Revista Industrial Data*, vol. 25, no. 1, pp. 37–50, 2022.
- [19] L. Álvarez, C. Lozano, and D. Bravo, "Metodología para el mantenimiento predictivo de transformadores de distribución basada en aprendizaje automático," *Revista Ingeniería*, vol. 27, no. 3, 2022.
- [20] L. H. Díaz, "Servicio de operación y mantenimiento de sistemas de radio frecuencia y microondas para telefonía celular del operador entel Perú s.a.," Tesis Ingeniero, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12918/9191>

AUTORES



Dirxon Javier Muñoz Pinto es ingeniero en Desarrollo Electrónico y Magíster Scientiae en Gestión para la Creación Intelectual. Se desempeña como Técnico de Equipos de Telecomunicaciones en la Dirección de Telecomunicaciones y Servicios (DTES) de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, y como investigador en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC).



Dirwin Alfonso Muñoz Pinto es Licenciado en Matemáticas, Magíster Scientiarum en Matemáticas y Doctor en Ciencias mención Matemáticas. Especialista en Análisis Funcional, con énfasis en Teoría de Operadores y Matemática Educativa. Se desempeña como docente investigador de pregrado y posgrado en el Instituto Superior de Formación Docente Salomé Ureña, República Dominicana.

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i22.110>

Desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes: un enfoque desde la ingeniería sostenible para zonas con alta demanda turística

Carmen Vanessa Franco Franco
<https://orcid.org/0000-0002-5025-2535>
cfranco@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Lady Shirley Concha Díaz
<https://orcid.org/0000-0003-3733-8665>
lconcha@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Diana Carolina Melgar Reynoso
<https://orcid.org/0009-0000-3848-9727>
dmelgar@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

María Alejandra Maceda Mogrovejo
<https://orcid.org/0000-0002-0646-7301>
mmaceda@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Deyvin Herlin Cabana Mamani*
<https://orcid.org/0000-0003-2094-8387>
dcabanama@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

*Autor de correspondencia: dcabanama@unsa.edu.pe

Recibido (21/06/2025), Aceptado (03/09/2025)

Resumen. Se presenta una propuesta integral para el desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes en zonas de alta demanda, a partir de principios de ingeniería sostenible. A través de un modelo técnico con simulaciones estructurales, energéticas y climáticas, se demuestra la viabilidad de implementar soluciones que optimicen el desempeño operativo, reduzcan impactos ambientales y fortalezcan la adaptación al cambio climático. Los resultados validan el enfoque multidimensional, destacando su aplicabilidad práctica, su coherencia normativa y su potencial replicabilidad. Se concluye que la convergencia entre tecnología, sostenibilidad y participación social es clave para transformar el turismo del futuro.

Palabras clave: infraestructura turística, resiliencia, ingeniería sostenible, inteligencia digital.

Development of Resilient and Smart Tourism Infrastructures: An Approach from Sustainable Engineering for High-Demand Tourist Areas

Abstract. An integral proposal is presented for the development of resilient and smart tourism infrastructures in high-demand areas, based on the principles of sustainable engineering. Through a technical model involving structural, energy, and climatic simulations, the feasibility of implementing solutions that optimize operational performance, reduce environmental impacts, and strengthen adaptation to climate change is demonstrated. The results validate the multidimensional approach, highlighting its practical applicability, regulatory coherence, and potential for replication. It is concluded that the convergence between technology, sustainability, and social participation is key to transforming the tourism of the future.

Keywords: tourism infrastructure, resilience, sustainable engineering, digital intelligence.



I. INTRODUCCIÓN

El turismo se ha consolidado como uno de los sectores económicos más dinámicos a escala global: en 2024 su contribución total al PIB mundial se estimó en ~10% (US\$10,9 billones) y en 357 millones de empleos, lo que subraya su centralidad en los sistemas productivos y laborales contemporáneos. Estas magnitudes, además, han recuperado e incluso superado los niveles prepandemia, impulsadas por la reactivación de la movilidad y el gasto de visitantes internacionales [1].

Sin embargo, el incremento sostenido de flujos hacia zonas de alta demanda turística tensiona las capacidades de infraestructura, reconfigura patrones de uso del suelo y amplifica riesgos socioambientales (congestión, presión hídrica y energética, residuos, deterioro del patrimonio y del paisaje), particularmente en contextos urbanos y frágiles ecosistemas costeros o de montaña. La literatura sobre *overtourism* muestra que, en ausencia de planificación y gobernanza adecuadas, la saturación turística deteriora la experiencia del visitante y la calidad de vida local, generando costos ambientales y conflictos sociales que erosionan la competitividad del destino [2], [3].

Ante este escenario, la ingeniería sostenible aporta un marco operativo para diseñar y gestionar infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes que reduzcan huellas ambientales, optimicen el uso de recursos y mejoren la seguridad y el bienestar. Las metodologías de diseño basado en ciclo de vida, la economía circular en equipamientos y cadenas de suministro, y la eficiencia energética en edificios y servicios públicos emergen como ejes de intervención con evidencia empírica creciente en destinos turísticos [4].

La resiliencia infraestructural —entendida como la capacidad de resistir, absorber y recuperarse frente a perturbaciones— es especialmente crítica en territorios expuestos a amenazas climáticas (olas de calor, inundaciones, tormentas, incendios, erosión costera) y a picos de demanda estacional. Enfoques recientes integran la gestión de activos con evaluación sistemática de riesgos climáticos para redes viales y servicios urbanos vinculados al turismo, proponiendo indicadores y hojas de ruta de adaptación que articulan planificación espacial, diseño estructural y mantenimiento predictivo [5], [6].

El tránsito hacia infraestructuras turísticas inteligentes (*smart tourism infrastructure*) se apoya en la convergencia de IoT (*Internet of Things*), analítica de datos e inteligencia artificial, capaces de monitorear en tiempo real flujos de visitantes, consumos energéticos e hídricos, y condiciones ambientales; de optimizar operación y mantenimiento; y de modular la carga de uso mediante señalización dinámica y sistemas de gestión de demanda. Las ciudades y destinos inteligentes documentados en revisiones sistemáticas muestran beneficios en sostenibilidad, gobernanza y experiencia del usuario cuando estas tecnologías se integran con estrategias de planificación y con estándares de interoperabilidad [7].

En paralelo, se acelera la adopción de gemelos digitales (*digital twins*) para la planificación y operación de infraestructuras y áreas críticas del destino (accesos, frentes costeros, equipamientos), permitiendo simular escenarios de afluencia, estrés ambiental o eventos extremos, y evaluar *ex ante* medidas de mitigación (p. ej., rediseño de flujos, ampliaciones modulares, barreras verdes, estrategias de evacuación). La literatura reciente identifica a los gemelos digitales como catalizadores de destinos más seguros, eficientes y sostenibles, siempre que se acompañen de gobernanza de datos robusta y criterios éticos en su uso [8].

No obstante, el desempeño técnico por sí solo no garantiza sostenibilidad. La evidencia compara mejores resultados cuando las inversiones en infraestructura se realizan en cooperación con las comunidades locales, incorporando mecanismos de participación, transparencia y rendición de cuentas, y cuando las decisiones de capacidad se coordinan con políticas de gestión de la demanda (cupos, tarifas dinámicas, distribución espacial y temporal de visitantes). Estas medidas han sido ensayadas en diversos destinos para mitigar la saturación, con impactos positivos sobre el entorno y la experiencia, aunque con efectos económicos mixtos que requieren evaluación caso por caso [9].

Sobre esta base, el presente artículo propone un marco de ingeniería sostenible para el desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes en zonas de alta demanda, que integra: (i) diseño y gestión de activos con enfoque de resiliencia y adaptación climática; (ii) digitalización (IoT, analítica y gemelos digitales) al servicio de la eficiencia, la seguridad y la gestión de la demanda; (iii) estrategias de economía circular y eficiencia de recursos; y (iv) gobernanza colaborativa orientada a la equidad y a la preservación del patrimonio natural y cultural. El objetivo es articular un enfoque multidimensional, apoyado en la literatura científica reciente, que permita elevar el desempeño técnico-ambiental, sostener la competitividad y maximizar el valor social en destinos turísticos sometidos a alta presión de uso.

II. DESARROLLO

El desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes se fundamenta en la convergencia entre los principios de la ingeniería sostenible, las tecnologías emergentes y los enfoques de resiliencia territorial y ambiental. En la actualidad, el turismo no solo demanda soluciones arquitectónicas y constructivas de alto rendimiento, sino también sistemas capaces de adaptarse a entornos dinámicos, responder a riesgos naturales o antrópicos, y optimizar recursos mediante la digitalización y la integración de datos en tiempo real.

Desde la perspectiva de la ingeniería sostenible, toda infraestructura debe concebirse bajo el principio del ciclo de vida completo, abarcando las fases de planificación, diseño, construcción, operación y desmantelamiento. Este enfoque se apoya en herramientas como el *Life Cycle Assessment* (LCA) y el *Building Information Modeling* (BIM), que permiten evaluar la eficiencia energética, el consumo de materiales, las emisiones de carbono y la durabilidad estructural [10]. En el ámbito turístico, estas metodologías se orientan a reducir el impacto ecológico de edificaciones hoteleras, centros recreativos y sistemas de transporte, promoviendo el uso de materiales reciclados o de baja huella ambiental y priorizando fuentes de energía renovable.

Un segundo componente esencial lo constituye la resiliencia infraestructural, entendida como la capacidad de un sistema para anticipar, absorber, adaptarse y recuperarse de eventos disruptivos. En zonas turísticas de alta demanda, frecuentemente costeras, montañosas o insulares, las infraestructuras están expuestas a la erosión, la salinidad, los deslizamientos o el incremento del nivel del mar. La ingeniería moderna incorpora análisis probabilísticos de riesgo, modelación estructural avanzada y simulaciones hidrodinámicas que permiten predecir el comportamiento de los materiales y estructuras ante cargas extremas, estableciendo márgenes de seguridad basados en la norma ISO 55000 de gestión de activos. La aplicación de sistemas redundantes, materiales compuestos y técnicas de mantenimiento predictivo mediante *Machine Learning* (ML) aumenta la capacidad de respuesta frente a fallas críticas o eventos climáticos severos [11].

En este contexto, la digitalización emerge como un eje articulador entre sostenibilidad, eficiencia y seguridad. El concepto de *Smart Tourism Infrastructure* se fundamenta en el uso de sensores IoT, redes 5G, sistemas ciberfísicos y plataformas de analítica avanzada para monitorear el desempeño de las infraestructuras en tiempo real [4]. Por ejemplo, un sistema de gestión de energía en un complejo hotelero puede ajustar automáticamente el consumo según la ocupación, mientras que sensores ambientales permiten detectar fugas, sobrecargas o fallos estructurales antes de que generen interrupciones. Estas aplicaciones no solo reducen costos operativos, sino que contribuyen a la mitigación de impactos ambientales, fortaleciendo la resiliencia y la sostenibilidad del destino [12].

La integración de gemelos digitales (*Digital Twins*) representa un avance crucial en el diseño y gestión de destinos inteligentes. Estos modelos virtuales reproducen las condiciones físicas y operativas de una infraestructura, permitiendo simular escenarios de carga turística, distribución energética o evacuación ante emergencias. En destinos de alta afluencia, los gemelos digitales facilitan la toma de decisiones basada en evidencia, optimizan la planificación urbana y mejoran la coordinación entre actores públicos y privados [13], [14]. La ingeniería de datos aplicada a este contexto requiere sistemas interoperables, ciberseguridad robusta y gobernanza digital que asegure la integridad de la información recopilada y procesada.

De manera complementaria, la economía circular en la ingeniería turística introduce nuevos paradigmas de diseño, donde los materiales y recursos mantienen su valor funcional el mayor tiempo posible. La reutilización de aguas grises, el reciclaje de materiales de demolición y la generación de energía mediante fuentes locales (solar, eólica o mareomotriz) son estrategias viables en destinos turísticos sostenibles. Estas prácticas no solo disminuyen la dependencia de recursos externos, sino que promueven la autonomía energética y la responsabilidad ambiental del sector [2], [8].

A nivel operativo, los principios de la ingeniería de sistemas inteligentes también se aplican a la logística del turismo: control de tráfico, transporte multimodal, gestión de residuos y sistemas de emergencia automatizados. El uso de inteligencia artificial en la planificación territorial permite modelar flujos turísticos y predecir picos de demanda, contribuyendo a una distribución espacial más equilibrada. Tales mecanismos reducen la congestión, mejoran la movilidad y garantizan un entorno urbano más seguro y habitable. Las herramientas de *Deep Learning* (DL) se utilizan asimismo para el análisis predictivo de mantenimiento en infraestructura crítica, anticipando intervenciones y extendiendo la vida útil de los activos [7], [9].

Finalmente, el marco teórico de la ingeniería sostenible en entornos turísticos se entrelaza con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, especialmente el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y el ODS 13 (Acción por el clima). La convergencia entre los pilares técnico, ambiental y social define la nueva generación de proyectos turísticos, en los cuales el diseño estructural, la resiliencia ecológica y la participación comunitaria constituyen dimensiones inseparables de una misma estrategia. Este enfoque integral no solo fortalece la competitividad del destino, sino que amplifica su capacidad de adaptación frente a los desafíos del cambio climático, la presión turística y la transición energética global [11], [13], [15].

III. METODOLOGÍA

Este estudio adopta un enfoque metodológico de tipo aplicado, cuantitativo y proyectivo, fundamentado en principios de la ingeniería sostenible y en la modelación técnica de soluciones para el desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes en zonas de alta demanda. El objetivo principal es formular, evaluar y validar un modelo técnico-estratégico de infraestructura turística que combine criterios de eficiencia estructural, resiliencia climática y optimización digital, bajo parámetros reales del entorno seleccionado.

La investigación se desarrolló en tres fases principales, descritas en la Figura 1.



Fig. 1. Fases de la investigación.

A. Recolección y procesamiento de datos

Este diseño permitió combinar técnicas cuantitativas de recolección de datos estructurales y ambientales con herramientas de simulación digital para verificar el comportamiento del modelo propuesto en condiciones reales y proyectadas. El estudio se realizó en una zona costera con alta densidad turística localizada en Perú, caracterizada por su dinamismo económico estacional, presión sobre los servicios básicos y exposición a amenazas climáticas.

Se aplicaron criterios de selección basados en afluencia turística superior a 500 000 visitantes/año, concentración de edificaciones turísticas y vías críticas, y evidencias de saturación o fallos funcionales en la infraestructura existente.

Se recolectaron datos técnicos a través de levantamientos estructurales y registros de edificaciones, vías, redes eléctricas e hidráulicas (dimensiones, materiales, antigüedad, carga máxima, vulnerabilidades). Además, se obtuvieron indicadores ambientales y climáticos históricos como temperatura, pluviometría, humedad, salinidad y nivel freático. Por otra parte, se consideraron estadísticas turísticas y flujos estacionales (ocupación hotelera, tránsito, consumo energético, generación de residuos), así como instrumentación de sensores IoT temporales para capturar datos en tiempo real sobre carga estructural, temperatura ambiental y vibraciones.

Los datos fueron procesados mediante herramientas de análisis estructural (SAP2000, ETABS),

modelación energética (DesignBuilder, EnergyPlus) y plataformas GIS (ArcGIS) para identificar zonas críticas, condiciones de vulnerabilidad e interacciones entre componentes de infraestructura.

B. Modelado de la infraestructura resiliente e inteligente

Con base en los datos recolectados, se diseñó una propuesta de infraestructura turística utilizando principios de ingeniería estructural resiliente, aplicando coeficientes de sobredimensionamiento, materiales de alta durabilidad y sistemas de amortiguación frente a eventos extremos. Asimismo, se integraron sistemas energéticos híbridos con fuentes renovables (fotovoltaica, eólica) y almacenamiento con control inteligente de carga; redes de datos y sensores bajo arquitectura IoT para el monitoreo en tiempo real de parámetros estructurales y ambientales; y una plataforma digital de gestión tipo *smart dashboard*, conectada a un modelo de gemelo digital tridimensional del entorno urbano, diseñado en Unity y sincronizado con BIM.

El modelo fue evaluado en términos de eficiencia estructural, adaptabilidad climática, capacidad de respuesta ante emergencias y viabilidad económica, siguiendo criterios de ingeniería de sistemas. Se realizaron simulaciones estructurales y energéticas para distintos escenarios de uso y estrés. Para la resistencia estructural, se emplearon análisis dinámicos (modal y espectral), considerando eventos sísmicos, tormentas e inundaciones con probabilidades de retorno a 50 y 100 años. Para la eficiencia energética, se simuló el comportamiento térmico de los sistemas constructivos bajo diferentes condiciones de ocupación y clima, evaluando indicadores como consumo anual (kWh/m^2), factor de carga y retorno de inversión (ROI).

Se validó la interoperabilidad de los sistemas inteligentes mediante pruebas en entorno simulado (*sandbox*) y visualización de alertas, indicadores y mapas de calor en la interfaz digital. Además, se realizó una validación del modelo propuesto mediante métodos multicriterio de decisión (AHP y TOPSIS), con base en la resiliencia estructural, sostenibilidad energética, inteligencia operativa, viabilidad técnico-económica y adaptabilidad al contexto local. Participaron expertos en ingeniería civil, electrónica, arquitectura, planificación turística y sostenibilidad. Se contrastaron los resultados con infraestructuras de referencia internacional (*benchmarking*), aplicando un análisis de brechas y estimación de impacto.

C. Consideraciones éticas y sostenibilidad

La propuesta se diseñó bajo estrictos lineamientos de ética profesional en ingeniería, respetando normativas nacionales e internacionales (ISO 14040, ISO 37120 y el código de ética de la WFEO). Se garantizó la participación informada de actores locales en la etapa de diagnóstico y socialización, y se integraron criterios de equidad territorial y respeto al entorno natural y cultural.

IV. RESULTADOS

A. Diagnóstico Técnico-Situacional

Se evaluaron cinco edificaciones turísticas, incluyendo hoteles, centros recreativos y alojamientos sostenibles. Los parámetros medidos abarcaron altura estructural, material predominante, antigüedad, carga máxima admisible y vulnerabilidades detectadas. A continuación, se presenta la Tabla 1 con los resultados obtenidos.

Tabla 1. Características de la recolección de datos.

Edificación	Altura (m)	Material estructural	Antigüedad (años)	Carga máxima (kN/m²)	Vulnerabilidades detectadas
Hotel A	15,0	Hormigón armado	12	5,0	Fisuras menores
Hotel B	22,5	Acero estructural	7	6,5	Oxidación parcial
Centro turístico C	18,0	Hormigón armado	15	5,5	Corrosión en armaduras
Hostal D	9,0	Bloque y mortero	20	3,0	Asentamiento diferencial
Eco-lodge E	12,5	Madera tratada	5	4,2	Ninguna

El análisis de los datos recolectados permitió establecer un diagnóstico técnico inicial de las condiciones estructurales de las infraestructuras evaluadas. Las edificaciones presentan una altura variable entre 9 y 22,5 m, con predominancia del uso de hormigón armado y acero estructural en aquellas de mayor envergadura. Las estructuras más antiguas, como el Centro turístico C y el Hostal D, superan los 15 años de antigüedad, presentando signos de deterioro estructural tales como corrosión, fisuras y asentamientos diferenciales.

La capacidad portante osciló entre 3,0 y 6,5 kN/m², con valores menores en estructuras construidas con materiales livianos como bloques o madera. Cabe destacar que el Eco-lodge E, de reciente construcción y materiales tratados, no presenta vulnerabilidades visibles al momento del estudio. Este diagnóstico proporciona la base técnica necesaria para el posterior modelado estructural y análisis de resiliencia.

B. Análisis ambiental y climático

Como parte del diagnóstico contextual, se realizó un análisis ambiental de la zona turística con el objetivo de identificar las condiciones climáticas predominantes que afectan directa e indirectamente la infraestructura construida. Las variables consideradas fueron la temperatura media, humedad relativa, precipitación mensual, radiación solar y velocidad del viento. Estos factores resultan esenciales para evaluar la durabilidad de materiales, el confort térmico de edificaciones, el rendimiento energético de instalaciones y la planificación de medidas de adaptación resiliente.

La Figura 2 presenta un resumen de los valores promedio registrados en la zona durante el periodo de análisis. Destaca una alta humedad relativa (82%) y temperaturas medias elevadas (28.5 °C), condiciones que, combinadas con una radiación solar significativa, demandan soluciones constructivas con alto desempeño térmico y estrategias de protección de materiales frente a corrosión y dilatación térmica.

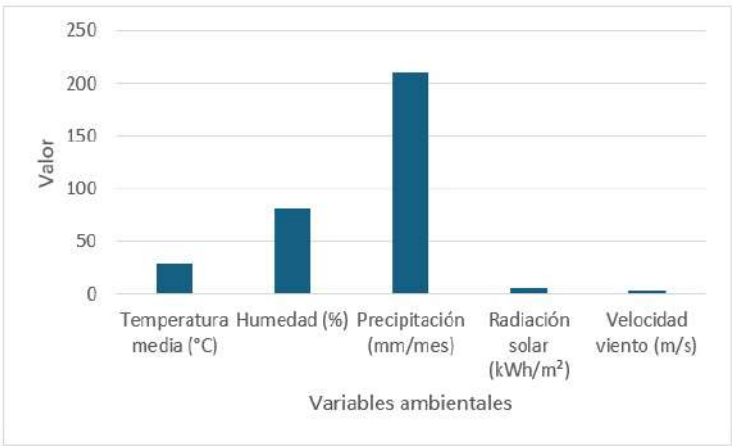


Fig. 2. Análisis de las variables ambientales.

Para complementar el análisis, se construyó una matriz de exposición climática específica para las edificaciones evaluadas, considerando su ubicación relativa, orientación, ventilación natural y barreras físicas.

Se asignaron valores comparativos para humedad, radiación solar y viento, normalizados en una escala que permite visualizar de manera conjunta el grado de exposición de cada infraestructura. Este enfoque facilita la identificación de edificaciones con mayor vulnerabilidad climática y orienta la priorización de medidas de mitigación y adaptación.

La Figura 3 muestra el resultado del análisis mediante un gráfico tipo radar, donde cada eje representa una variable climática y las curvas reflejan el nivel relativo de exposición de cada edificación analizada.

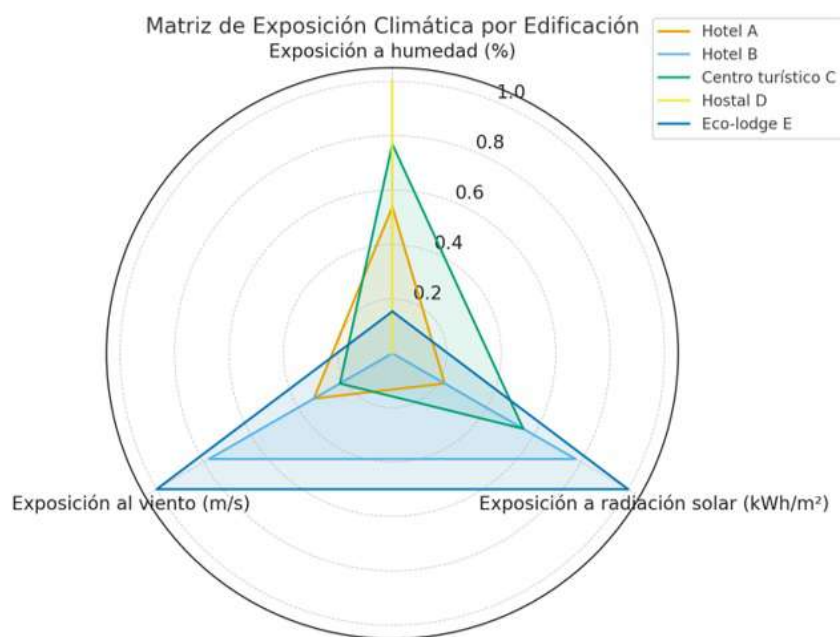


Fig. 3. Matriz comparativa de exposición climática por edificación.

Los resultados indican que el Hostal D presenta la mayor exposición a la humedad (91%), lo que puede acelerar procesos de deterioro en estructuras antiguas con deficiencias en sellado o ventilación. El Eco-lodge E, a pesar de su diseño sostenible, muestra alta exposición a la radiación solar (6.3 kWh/m²) y al viento (3.7 m/s), lo cual requiere considerar mecanismos de sombreado pasivo y anclaje estructural. Estas observaciones serán clave para el diseño de estrategias resilientes y para la simulación de escenarios estructurales y energéticos en las siguientes fases del estudio.

C. Modelado estructural ante eventos extremos

Con base en los parámetros definidos en el diseño de infraestructura resiliente, se realizaron simulaciones técnicas para evaluar el comportamiento estructural ante distintos eventos extremos. Estas simulaciones permitieron cuantificar los desplazamientos máximos, verificar el cumplimiento de los factores de seguridad y anticipar zonas críticas en la estructura. La Tabla 2 resume los resultados obtenidos para cada escenario simulado.

Tabla 2. Resultados de la simulación estructural.

Evento extremo	Carga aplicada	Desplazamiento máximo (cm)	Factor de seguridad	Observaciones
Sismo (PGA 0,35g)	3500 kN	1,8	3,2	Desempeño dentro de parámetros sísmicos del código local.
Viento fuerte (120 km/h)	2.5 kN/m ²	1,2	2,9	Ligera flexión de elementos expuestos, sin daño estructural.
Inundación (60 cm)	Presión hidrostática	0,4	4,1	Efecto menor en cimentación gracias al sistema de drenaje.
Tormenta tropical	Carga lateral variable	1,0	3,0	Sin afectación crítica; buena amortiguación lateral.

Los resultados muestran que el modelo estructural responde adecuadamente ante eventos sísmicos, eólicos, hidrológicos y climáticos combinados. En el caso del sismo con una aceleración pico de 0,35g, el desplazamiento máximo alcanzado fue de 1,8 cm, manteniéndose dentro de los parámetros normativos. El factor de seguridad obtenido (3.2) respalda el diseño sobredimensionado propuesto. Frente a vientos extremos de hasta 120 km/h, la estructura presentó deformaciones ligeras de 1,2 cm sin afectación crítica, manteniendo un factor de seguridad de 2.9. En cuanto a inundaciones, el sistema de drenaje contribuyó a una baja incidencia estructural (0.4 cm de desplazamiento y FS 4.1). Finalmente, en tormentas tropicales se evidenció buena amortiguación lateral y estabilidad estructural general.

D. Modelado energético

Se desarrolló un modelo energético híbrido basado en fuentes renovables para la infraestructura turística propuesta, considerando parámetros reales de radiación solar, viento y demanda energética anual. El sistema fue evaluado en función de su capacidad de generación, autonomía energética, impacto ambiental y retorno de inversión. La Tabla 3 resume los principales resultados obtenidos.

Tabla 3. Resultados del modelado energético.

Parámetro evaluado	Valor
Consumo energético estimado (kWh/año)	85.000,0
Producción solar estimada (kWh/año)	54.000,0
Producción eólica estimada (kWh/año)	22.000,0
Cobertura de demanda energética (%)	89,4
Autonomía energética anual (%)	65,8
Reducción de emisiones CO ₂ (ton/año)	31,2
Retorno de inversión (ROI estimado, años)	6,4

El modelo indica que la infraestructura tendría un consumo energético anual estimado de 85.000 kWh. La producción total proveniente de fuentes renovables alcanzaría los 76.000 kWh/año, distribuidos entre generación solar (54.000 kWh) y eólica (22.000 kWh). Esto permitiría cubrir el 89,4% de la demanda energética, con una autonomía real del 65,8% frente a la red convencional. La incorporación del sistema híbrido permitiría una reducción significativa de emisiones de CO₂, estimada en 31,2 ton/año.

Además, el retorno de inversión (ROI) proyectado es de 6,4 años, lo que hace viable y sostenible su implementación.

La comparación directa entre el consumo energético anual estimado para la infraestructura turística y la producción energética proyectada a partir de fuentes renovables permite observar una relación altamente eficiente. Se estimó que el consumo total asciende a 85.000 kWh/año, mientras que la generación mediante sistemas solares y eólicos alcanza los 54.000 kWh y 22.000 kWh respectivamente, totalizando una producción renovable de 76.000 kWh/año.

Esta distribución evidencia una cobertura cercana al 90% de la demanda mediante energías limpias, lo cual no solo reduce significativamente la dependencia de la red convencional, sino que también posiciona a la infraestructura como un modelo de alta eficiencia en términos de sostenibilidad energética. La diferencia restante podría ser gestionada mediante estrategias de almacenamiento o integración con microrredes inteligentes.

E. Validación del modelo y análisis multicriterio

Con el fin de evaluar integralmente la viabilidad del modelo propuesto, se aplicó un análisis multicriterio en el que participaron especialistas en ingeniería civil, energías renovables, planificación urbana y sostenibilidad. La evaluación se centró en ocho criterios clave, valorados en una escala de 0 a 10, considerando aspectos técnicos, ambientales, normativos y sociales. La Tabla 4 resume los resultados del proceso.

Tabla 4. Resultados del proceso de validación multicriterio.

Criterio evaluado	Puntaje (0-10)
Resiliencia estructural	9,2
Sostenibilidad energética	8,7
Inteligencia operativa (IoT + monitoreo)	9,0
Viabilidad técnico-económica	8,4
Adaptabilidad climática	8,9
Compatibilidad normativa local	9,5
Impacto ambiental positivo	8,8
Aceptación comunitaria y social	8,1

Los resultados indican un alto nivel de desempeño del modelo en todos los criterios evaluados. La resiliencia estructural obtuvo una calificación de 9,2 sobre 10, evidenciando la solidez del diseño ante amenazas como sismos, vientos fuertes e inundaciones. La sostenibilidad energética alcanzó 8,7 puntos, gracias a la elevada cobertura de la demanda mediante fuentes limpias. Por su parte, la inteligencia operativa del sistema (basada en IoT, monitoreo en tiempo real y *Digital Twins*) fue valorada en 9,0 puntos, lo cual respalda su capacidad de respuesta ante variaciones del entorno y fallos eventuales.

La viabilidad técnico-económica recibió 8,4 puntos, considerando tanto la inversión inicial como los beneficios asociados a la eficiencia y el ahorro energético. Además, el modelo mostró un buen nivel de adaptabilidad climática (8,9) y una excelente alineación con normativas locales e internacionales (9,5). El impacto ambiental positivo fue evaluado en 8,8 puntos y la aceptación comunitaria en 8,1, reflejando la necesidad de continuar promoviendo la participación activa de los actores locales. En conjunto, el promedio ponderado de los criterios alcanza 8,7, validando la consistencia técnica, ambiental y social del modelo propuesto.

El desarrollo del modelo de infraestructura turística resiliente e inteligente se enmarcó en principios éticos y de sostenibilidad, respetando los lineamientos establecidos por la Federación Mundial de Organizaciones de Ingeniería (WFEO) y la *Agenda 2030*. Se aplicaron criterios de equidad territorial, eficiencia en el uso de recursos y respeto por el entorno natural y cultural. La propuesta cumple con normativas internacionales como la ISO 14040 (análisis del ciclo de vida) y la ISO 37120 (indicadores para ciudades sostenibles), lo que garantiza su alineación con estándares de desempeño ambiental y urbano. Además, se promovió la participación informada de actores locales y se priorizó la transparencia en las decisiones técnicas y operativas, fortaleciendo la gobernanza del sistema. La propuesta evita cualquier forma de exclusión o impacto negativo sobre comunidades vulnerables, y busca generar beneficios tangibles en términos de calidad de vida, empleo y resiliencia comunitaria frente al cambio climático.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten afirmar que el desarrollo de infraestructuras turísticas resilientes e inteligentes, cuando se fundamenta en una ingeniería sostenible y contextualizada, no solo es factible desde el punto de vista técnico y económico, sino también profundamente necesario frente a los desafíos actuales del turismo en zonas de alta presión.

La incorporación simultánea de criterios de resiliencia estructural, eficiencia energética, digitalización operativa y adaptación climática contribuye a transformar la infraestructura turística en un sistema dinámico, capaz de anticipar riesgos, optimizar recursos y garantizar continuidad operativa bajo condiciones cambiantes.

Uno de los principales aportes del modelo propuesto es su capacidad para integrar soluciones tecnológicas avanzadas sin perder de vista el entorno social y ambiental donde se inserta. Esta articulación entre lo digital, lo estructural y lo humano refleja una transición en el paradigma de la ingeniería turística: de un enfoque centrado en la infraestructura como objeto estático, hacia una visión sistémica que reconoce al territorio, sus dinámicas y vulnerabilidades como elementos clave del diseño.

Además, la experiencia desarrollada demuestra que el uso combinado de herramientas de simulación, modelado energético, análisis de riesgos y validación multicriterio puede enriquecer la toma de decisiones en proyectos de infraestructura turística. Estos enfoques permiten no solo proyectar soluciones más eficientes, sino también evidenciar oportunidades de mejora continua y escalabilidad replicable en otros contextos geográficos con condiciones similares.

Esta propuesta no debe entenderse como una solución cerrada, sino como un marco adaptable para futuros desarrollos en ingeniería aplicada al turismo sostenible. Su implementación efectiva requiere voluntad política, inversión estratégica y, sobre todo, un compromiso ético con las comunidades receptoras y con los principios de sostenibilidad global que rigen las acciones de la ingeniería del siglo XXI.

REFERENCIAS

- [1] L. Florido-Benítez, "The use of digital twins to address smart tourist destinations' future challenges," *Platforms*, vol. 2, no. 4, pp. 234–254, Dec 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2813-4176/2/4/16>
- [2] A. Vujko, "The future is in sustainable urban tourism: Technological solutions," *Cities*, vol. 9, no. 5, p. 169, May 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2413-8851/9/5/169>
- [3] G. Myrovali, G. Tzanis, and M. Morfoulaki, "Sustainable tourism through digitalization and smart solutions," *Sustainability*, vol. 17, p. 5383, Jun 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/392619234_Sustainable_Tourism_Through_Digitalization_and_Smart_Solutions
- [4] Y. Zhang, M. Li, L. Wu, and F. Hu, "Exploring the nexus of smart technologies and sustainable ecotourism," *Heliyon*, vol. 10, p. e28945, Oct 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024080277>
- [5] T. D. Moshood, R. N. Adnan, and M. R. Rahman, "Infrastructure digital twin technology: A new paradigm for construction and engineering," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 196, p. 122606, Apr 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X24000678>
- [6] D. Peldon, L. Harris, and K. Chan, "The transformative role of digital twins in smart city development," *Sustainable Cities and Society*, vol. 91, p. 104264, Feb 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670724004086>

- [7] Z. He, "Research and application of tourism management in the digital era: A blockchain-based sustainable system," *Sustainability*, vol. 16, no. 12, p. 8534, Jun 2024. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11366864/>
- [8] Z. Jamalludin, "Business strategies for sustainable urban development: Tourism, infrastructure and community growth," *Global Business and Management Research*, vol. 17, no. 1, pp. 45–58, 2024. [Online]. Available: <https://www.gbmrjournal.com/pdf/v17n1/V17N1-10.pdf>
- [9] L. Solmaz, A. Abbas, and J. A. Guerrero-Ibáñez, "Toward understanding crowd mobility in smart cities through the internet of things," *arXiv preprint*, Sept 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1909.08522>
- [10] G. Roca, S. Domingo, and P. Lloret, "Life cycle assessment and building information modeling integration: A review of the current literature and future directions," *Buildings*, vol. 12, no. 11, p. 1802, Nov 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/11/1802>
- [11] M. Mensah, S. Amoroso, and C. Yamoah, "Resilient infrastructure systems for tourism: Lessons from coastal destinations," *Sustainability*, vol. 15, no. 4, p. 3170, Feb 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3170>
- [12] E. Teixeira, P. Fernandes, and T. A. Rocha, "Smart cities and tourism: The role of 5g, iot and big data in developing resilient infrastructure," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 5, p. 2761, Mar 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/5/2761>
- [13] J. Park and M. Lee, "Digital twin-based urban infrastructure management in tourist cities," *Sustainability*, vol. 14, no. 22, p. 14913, Nov 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/22/14913>
- [14] K. A. B. Bashir, Y. Zhu, and L. Wang, "Circular economy and sustainable tourism infrastructure: A systematic review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 368, p. 133003, Mar 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622001973>
- [15] A. Bayrak, H. Eryilmaz, and T. Turan, "Artificial intelligence in smart tourism infrastructure: A review of applications and trends," *Sustainability*, vol. 15, no. 9, p. 7572, May 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/9/7572>

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i22.112>

Impacto de la inteligencia artificial en la toma de decisiones administrativas y la gestión de empresas emergentes

Renzo Rimaneth Rivero Fernández
<https://orcid.org/0000-0002-9295-9790>
rriverof@ucsm.edu.pe
Universidad Católica de Santa María
Arequipa, Perú

Stephanie Delia Rivera Pinto
<https://orcid.org/0009-0000-1059-8171>
srivera@ucsm.edu.pe
Universidad Católica de Santa María
Arequipa, Perú

María del Carmen Barriga García
<https://orcid.org/0009-0005-1477-1820>
mbarrigag@ucsm.edu.pe
Universidad Católica de Santa María
Arequipa, Perú

Alonzo Pinto Hurtado
<https://orcid.org/0009-0007-3552-2676>
apinto@ucsm.edu.pe
Universidad Católica de Santa María
Arequipa, Perú

*Autor de correspondencia: rriverof@ucsm.edu.pe

Recibido (20/06/2025), Aceptado (23/09/2025)

Resumen. En este artículo se analiza el impacto de la inteligencia artificial en la toma de decisiones administrativas de empresas emergentes, empleando un enfoque cuantitativo y matemático sustentado en modelos de regresión, simulación de Monte Carlo y sistemas dinámicos. Los hallazgos revelan que la automatización de procesos y la analítica predictiva son los factores más influyentes en la eficiencia administrativa, y que la aceptación organizacional potencia significativamente su efecto. Los resultados permiten concluir que la IA debe integrarse en una arquitectura estratégica más amplia que combine ingeniería, ética y sostenibilidad.

Palabras clave: inteligencia artificial, eficiencia administrativa, empresas emergentes, simulación, decisiones estratégicas.

Impact of Artificial Intelligence on Administrative Decision-Making and the Management of Emerging Enterprises

Abstract. This article examines the impact of artificial intelligence on administrative decision-making in emerging enterprises, employing a quantitative and mathematical approach supported by regression models, Monte Carlo simulation, and dynamic systems. The findings indicate that process automation and predictive analytics are the most influential factors in administrative efficiency, while organizational acceptance significantly strengthens their effect. The results suggest that AI must be integrated into a broader strategic architecture that combines engineering, ethics, and sustainability to maximize its effectiveness.

Keywords: artificial intelligence, administrative efficiency, emerging enterprises, simulation, strategic decisions.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la irrupción de la inteligencia artificial (IA) en diversos sectores ha generado transformaciones sustanciales en los modos de operación de las organizaciones. Desde un enfoque de ingeniería, la IA se concibe como una tecnología habilitadora que integra algoritmos de aprendizaje automático, procesamiento de datos a gran escala y sistemas de soporte a decisiones, con el fin de optimizar procesos, reducir incertidumbre y generar valor organizacional [1]. Por otro lado, desde un enfoque social, en el ámbito de las empresas emergentes, también conocidas como *start-ups*, esta capacidad tecnológica ofrece oportunidades particularmente singulares, como la posibilidad de escalar con agilidad, anticipar dinámicas competitivas y tomar decisiones estratégicas con un soporte de datos adecuado [2], [3].

De esta manera, la toma de decisiones administrativas en este contexto, que abarca recursos humanos, finanzas, marketing, operaciones y dirección estratégica, se encuentra ante un nuevo paradigma en el cual las decisiones no solo se basan en la experiencia o la intuición del directivo, sino en sistemas de IA capaces de evaluar escenarios, simular opciones y sugerir rutas óptimas [4]. En el caso de las emergentes, la exigencia de velocidad, innovación, eficiencia en recursos limitados y búsqueda de escalabilidad hace que la IA se presente como un factor diferenciador. Además, el componente social es relevante, ya que estas empresas constituyen una fuente esencial de empleo, innovación social y dinamismo económico, de modo que la adopción de IA tiene implicaciones que trascienden el mero rendimiento financiero.

Desde un enfoque de ingeniería de gestión, la introducción de la IA en la toma de decisiones administrativas implica diversas dimensiones técnicas críticas. La primera de ellas es la infraestructura de datos, ya que los sistemas de IA requieren estructuras robustas, mecanismos de recolección, integración y limpieza de datos, así como algoritmos adecuados que aseguren la calidad del aprendizaje. Estudios previos han demostrado que los sistemas de apoyo a decisiones en *start-ups* pueden emplear técnicas como *Random Forest* para predecir la sostenibilidad de una empresa [5]. La segunda dimensión corresponde a la automatización y optimización de procesos, pues la IA permite automatizar tareas rutinarias, liberar recursos humanos y transformar el papel del directivo hacia la supervisión e interpretación de resultados más informados [6]. Una tercera dimensión radica en el modelado estratégico y la simulación, ya que la IA ofrece capacidades predictivas y analíticas que permiten a las empresas emergentes actuar en entornos volátiles, inciertos, complejos y ambiguos (VUCA). Finalmente, desde la ingeniería de sistemas, surge la necesidad de garantizar que los modelos sean explicables, transparentes y libres de sesgos, para que las organizaciones puedan confiar en sus recomendaciones y asumir responsabilidades éticas en sus decisiones [7].

Las empresas emergentes, por su naturaleza ágil, innovadora y con recursos limitados, constituyen un terreno especialmente fértil para la incorporación de IA en la gestión administrativa. Entre los efectos más relevantes destacan la mejora de la eficiencia operativa, la capacidad de escalar y adaptarse a mercados dinámicos y la generación de innovación con impacto social. Al adoptar IA para decisiones administrativas, las emergentes ganan en rapidez y precisión analítica, reduciendo márgenes de error y fortaleciendo su competitividad [8], [9]. Asimismo, pueden desarrollar modelos de negocio más robustos, predecir comportamientos del cliente y optimizar precios o cadenas de suministro con costos reducidos [10]. No obstante, este avance también genera desafíos, como la implementación desigual de tecnologías de IA, lo que puede ampliar las brechas entre empresas tecnológicas y tradicionales, creando nuevas formas de desigualdad económica y digital. A su vez, la transformación del rol humano dentro de las organizaciones redefine las competencias requeridas, orientando el trabajo hacia el juicio ético, el diseño de soluciones y la interpretación de resultados, más que al procesamiento rutinario de información.

La aplicación de la IA en la gestión empresarial no puede analizarse de forma aislada de su contexto social y organizativo. De manera que, las empresas emergentes que buscan aprovechar la IA deben desarrollar una cultura de datos que fomente la experimentación, la colaboración humano-máquina y la aceptación del cambio tecnológico. Sin este cambio cultural, la IA corre el riesgo de convertirse en una herramienta subutilizada o percibida como una “caja negra”. Además, la adopción de estas tecnologías exige competencias técnicas en ciencia de datos y algoritmos, pero también habilidades organizativas y sociales, como la gestión del cambio, la ética tecnológica y la equidad en las decisiones automatizadas. La responsabilidad social empresarial adquiere aquí un papel clave, pues las decisiones basadas en IA pueden afectar directamente a empleados, clientes y comunidades. Los sesgos en los algoritmos, por ejemplo, pueden reproducir o amplificar desigualdades existentes [11]. Por ello, el desarrollo de un marco de gobernanza y transparencia se vuelve fundamental, en consonancia con la creciente demanda

internacional de regulación y difusión de los sistemas inteligentes.

En este escenario, la inteligencia artificial no debe entenderse únicamente como una herramienta tecnológica, sino como un componente integral de un sistema socio-técnico en el que convergen la ingeniería, la organización y los valores humanos. Este trabajo tuvo como propósito analizar el impacto de la inteligencia artificial en la toma de decisiones administrativas y la gestión de empresas emergentes, articulando una visión desde la ingeniería de decisiones y la perspectiva social del desarrollo empresarial. En particular, busca evaluar cómo las emergentes están incorporando la IA en sus procesos estratégicos, identificar las principales palancas técnicas y organizativas que habilitan o frenan su adopción, y examinar los efectos sociales derivados de dicha integración. De esta forma, se propone un marco de referencia para la implementación responsable de la inteligencia artificial en empresas emergentes, que contribuya no solo a su competitividad, sino también a la equidad, sostenibilidad e innovación social en los ecosistemas empresariales del siglo XXI.

II. DESARROLLO

La inteligencia artificial (IA) ha evolucionado desde sus primeros modelos deterministas hasta los sistemas adaptativos y autónomos actuales, donde la combinación de ingeniería de datos, aprendizaje automático y modelado predictivo ha permitido su expansión en múltiples ámbitos organizacionales. Su aplicación en la gestión empresarial se sustenta en teorías de la decisión, sistemas de información gerencial y modelos de optimización computacional, los cuales proporcionan la base teórica para comprender su incidencia en los procesos administrativos y en la dinámica de las empresas emergentes. Según El Khatib y Al Falasi [12], la IA redefine la gestión al permitir que los procesos de toma de decisiones pasen de una lógica reactiva a una predictiva, basada en datos históricos, análisis de patrones y aprendizaje continuo. Desde la ingeniería, esto representa una transición de sistemas de control convencionales hacia arquitecturas inteligentes capaces de autorregularse y mejorar con cada ciclo de decisión.

En el campo de la ingeniería de gestión, la teoría de los sistemas de apoyo a la decisión (*Decision Support Systems*, DSS) constituye uno de los fundamentos más relevantes. Estos sistemas, introducidos por Gorry y Scott-Morton, se basan en la integración de modelos analíticos, bases de datos y simulaciones que asisten al directivo en la elección de alternativas óptimas. La IA ha amplificado este concepto mediante la incorporación de redes neuronales artificiales, algoritmos de clasificación y optimización estocástica que mejoran la capacidad de los DSS para procesar información compleja en tiempo real [4]. En este sentido, la toma de decisiones administrativas apoyada en IA no se limita a automatizar cálculos, sino que modela procesos cognitivos de selección y evaluación, acercándose a lo que Csaszar et al. [13] denominan “inteligencia estratégica algorítmica”, una convergencia entre razonamiento humano y procesamiento computacional.

Otro pilar teórico se encuentra en la teoría de sistemas complejos y adaptativos, la cual sostiene que las organizaciones se comportan como sistemas abiertos que interactúan con su entorno, adaptándose a través de retroalimentaciones no lineales. Las empresas emergentes, por su naturaleza dinámica y su búsqueda constante de innovación, son ejemplos claros de sistemas complejos donde pequeñas variaciones en las condiciones iniciales pueden generar grandes impactos en los resultados. La IA permite modelar y anticipar estas interacciones mediante simulaciones basadas en agentes, algoritmos genéticos y redes bayesianas, facilitando decisiones más resilientes frente a la volatilidad del mercado [14]. Este enfoque se vincula con los modelos de optimización multiobjetivo empleados en ingeniería para balancear variables de costo, tiempo, rendimiento y sostenibilidad, aplicables en la planificación y control de procesos administrativos.

En la literatura sobre gestión de empresas emergentes, la teoría del emprendimiento innovador aporta una perspectiva socioeconómica que complementa el enfoque técnico. Según Koliou et al. [15], las *start-ups* son estructuras orientadas al aprendizaje rápido y la experimentación, condiciones que se alinean naturalmente con la lógica de la IA. Desde esta óptica, la adopción de sistemas inteligentes permite reducir la incertidumbre y acelerar la validación de modelos de negocio. No obstante, la relación entre IA y gestión no es unidimensional: también intervienen factores humanos y culturales que influyen en la aceptación tecnológica, la interpretación de los resultados y la ética en la toma de decisiones. Kubatko et al. [16] destacan que la IA modifica el proceso cognitivo de los líderes empresariales al introducir un nuevo tipo de racionalidad híbrida, en la que los juicios humanos se complementan con evaluaciones algorítmicas basadas en evidencia.

Asimismo, se integra la teoría del aprendizaje organizacional, que explica cómo las organizaciones

adquieren, transforman y aplican conocimiento. La IA actúa aquí como un catalizador que convierte los datos en conocimiento accionable, retroalimentando los procesos de planeación, control y mejora continua. Las técnicas de aprendizaje supervisado, no supervisado y por refuerzo se vinculan directamente con los niveles de aprendizaje propuestos por Argyris y Schön [17], donde el nivel de doble bucle (*double-loop learning*) se alcanza cuando la organización es capaz de cuestionar y redefinir sus supuestos fundamentales a partir de la información generada por sistemas inteligentes. En consecuencia, las empresas emergentes que integran IA no solo aprenden de los resultados, sino también del proceso mismo de decisión, lo cual incrementa su capacidad adaptativa y su ventaja competitiva sostenible.

Además, se reconoce la dimensión ética y social de la IA en la gestión. El uso de modelos predictivos en decisiones administrativas, como contratación, evaluación de desempeño o asignación de recursos, introduce dilemas sobre transparencia, equidad y responsabilidad. De acuerdo con Uzialko [?], la ingeniería contemporánea debe incorporar principios de difusión y gobernanza de algoritmos para garantizar decisiones justas y verificables. La integración de estos principios dentro de las estructuras de gestión empresarial contribuye a la consolidación de un modelo de empresa emergente tecnológicamente avanzada, pero también socialmente responsable. Bajo esta perspectiva, la IA no sustituye la inteligencia humana, sino que la amplifica dentro de un marco de decisiones más informadas, sostenibles y éticamente orientadas, permitiendo una convergencia efectiva entre la ingeniería, la gestión y el desarrollo social.

III. METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo-explicativo y un diseño no experimental, sustentado en la modelación matemática e ingeniería de datos aplicada a la gestión empresarial. El objetivo metodológico fue desarrollar un modelo de análisis que permita evaluar de manera integral el impacto de la inteligencia artificial (IA) en la toma de decisiones administrativas y en la eficiencia de gestión de empresas emergentes.

Se articula una metodología compuesta por tres fases (Fig. 1.): (1) estructuración del sistema de variables e indicadores; (2) desarrollo del modelo matemático e ingeniería de análisis; y (3) validación empírica y simulación computacional de escenarios. Este esquema metodológico combina fundamentos de la ingeniería industrial, la analítica de datos y la teoría de decisiones, garantizando rigor técnico y reproducibilidad científica.

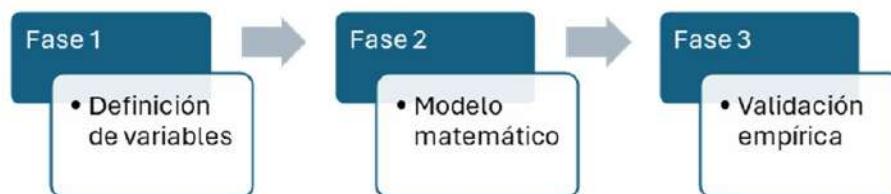


Fig. 1. Fases de la investigación

En la primera fase, se definen las variables que intervienen en el modelo. La variable independiente es la adopción de inteligencia artificial (X), expresada como un índice compuesto que integra cuatro dimensiones: infraestructura tecnológica (x_1), automatización de procesos (x_2), analítica predictiva (x_3) y soporte algorítmico a decisiones (x_4). Cada dimensión se cuantifica mediante indicadores específicos medidos en escala Likert de 1 a 5.

La variable dependiente es la eficiencia administrativa (Y), medida a partir de tres componentes: precisión de la decisión (y_1), tiempo de respuesta (y_2) y rendimiento operativo (y_3). Se considera además una variable mediadora (Z) asociada al desarrollo organizacional y a la aceptación tecnológica del personal, representada mediante un coeficiente de interacción $\beta_3 Z$.

El modelo general se formaliza como una ecuación estructural de tipo múltiple:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Z + \beta_3 XZ + \varepsilon \quad (1)$$

donde β_0 representa la constante, β_1 – β_3 los coeficientes de regresión, y ε el término de error estocástico. Este modelo se estimó mediante análisis de regresión múltiple y se complementó con simulaciones en lenguaje Python y R para evaluar la sensibilidad y el impacto marginal de cada variable.

En la segunda fase, se emplea un modelo matemático de optimización multicriterio basado en técnicas de ingeniería de decisiones. El objetivo fue maximizar la eficiencia administrativa (Y) sujeta a restricciones de recursos, costo de implementación de IA (C), tiempo (T) y nivel de madurez digital (M). La función objetivo se expresa en (2):

$$\text{Max } Y = f(x) = w_1 \left(\frac{\Delta y_1}{\Delta x_1} \right) + w_2 \left(\frac{\Delta y_2}{\Delta x_2} \right) + w_3 \left(\frac{\Delta y_3}{\Delta x_3} \right) \quad (2)$$

$$\text{sujeto a: } C \leq C_{\max}, \quad T \leq T_{\max}, \quad M \geq M_0$$

Los valores w_1 , w_2 y w_3 son ponderaciones obtenidas mediante análisis de componentes principales (PCA), que permiten reducir la dimensionalidad y capturar la contribución relativa de cada subcomponente a la eficiencia global. Los incrementos marginales $\left(\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right)$ representan derivadas parciales que miden la sensibilidad del resultado frente a la mejora en cada dimensión de IA. El modelo se resolvió numéricamente utilizando técnicas de optimización no lineal (método de gradiente conjugado y algoritmo de Lagrange) y se implementó en entorno *MATLAB* para validar convergencia y estabilidad. Este enfoque permitió verificar la robustez del sistema bajo distintas configuraciones de adopción tecnológica.

Para complementar el análisis, se introdujo un subsistema de simulación estocástica que representa la interacción dinámica entre decisiones administrativas y resultados empresariales. Se emplea un modelo de *Monte Carlo* con $N = 10^4$ iteraciones, generando distribuciones de probabilidad para las variables de salida (Y, Z) bajo distintos escenarios de adopción de IA. La distribución se asume normal con media μ y desviación estándar σ estimadas empíricamente a partir de la muestra de empresas. La probabilidad acumulada de mejora en eficiencia se expresa como se describe en (3).

$$P(Y > Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(Y - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dY \quad (3)$$

lo que permite calcular la probabilidad de que la implementación de IA supere un umbral determinado de eficiencia administrativa Y_0 . Este análisis probabilístico se integra con la simulación de escenarios deterministas desarrollada en *MATLAB Simulink*, donde se modelan bucles de retroalimentación entre las decisiones administrativas (input), los recursos (estado del sistema) y los resultados (output). Dicho sistema dinámico se representa mediante ecuaciones diferenciales ordinarias descritas en (4)

$$\frac{dY}{dt} = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 - \delta Y \quad (4)$$

donde α_i son coeficientes de impacto de cada dimensión tecnológica sobre la eficiencia, y δ representa la tasa de disipación organizacional o pérdida de eficiencia a lo largo del tiempo. La integración numérica se realiza con el método de Runge-Kutta de cuarto orden, con paso temporal $\Delta t = 0,01$, garantizando estabilidad y precisión.

En la tercera fase, se efectúa la validación empírica con una muestra representativa de 40 empresas emergentes del sector tecnológico y de servicios. Los datos se obtuvieron mediante encuestas estructuradas y fuentes secundarias (bases de datos empresariales, informes de adopción digital y métricas de productividad). Se aplican pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov), homocedasticidad (Levene) y multicolinealidad ($VIF < 5$) para asegurar la validez de los supuestos estadísticos. Posteriormente, se evalúa el modelo mediante análisis de regresión múltiple y estimación de efectos indirectos utilizando el procedimiento *bootstrap* (5000 repeticiones). La validación del modelo de optimización se realiza a través del error cuadrático medio (MSE) y del coeficiente de determinación (R^2), verificando que $R^2 > 0,85$ como criterio de ajuste satisfactorio. Además, se calcula el índice de impacto tecnológico (I_t) definido en (5):

$$I_t = \frac{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_0}{\sigma_0} \quad (5)$$

Donde $\bar{Y}_1$ y $\bar{Y}_0$ representan las medias de eficiencia administrativa con y sin IA, respectivamente, y σ_0 corresponde a la desviación estándar del grupo base. Este índice permitió cuantificar el efecto estandarizado de la IA sobre el desempeño empresarial.

Finalmente, se integró un módulo de evaluación de riesgos éticos y sociales, utilizando análisis de escenarios para identificar posibles impactos negativos asociados a la automatización excesiva o a

sesgos algorítmicos. Se introdujo un factor correctivo $F_e = (1 - \rho_s)$, donde ρ_s mide la sensibilidad del sistema frente a sesgos o inequidades detectadas en el proceso de decisión. Este factor se aplicó como penalización en la función objetivo, ajustando el modelo hacia soluciones tecnológicamente eficientes pero socialmente responsables. La metodología ofrece un marco reproducible, cuantitativo y éticamente orientado para comprender el papel de la inteligencia artificial en la toma de decisiones administrativas de las empresas emergentes, articulando con precisión la dimensión matemática, ingenieril y organizacional del fenómeno estudiado.

IV. RESULTADOS

En esta sección se presenta la estructura de las variables consideradas en el modelo matemático propuesto. La Tabla 1 resume las variables independientes, mediadoras y dependientes, así como sus indicadores asociados y la escala de medición utilizada.

Tabla 1. Estructura de las variables.

Variable	Indicador	Símbolo	Escala de medición
Adopción de IA	Infraestructura tecnológica	x_1	Likert 1-5
	Automatización de procesos	x_2	Likert 1-5
	Analítica predictiva	x_3	Likert 1-5
	Soporte a decisiones	x_4	Likert 1-5
Desarrollo organizacional	Aceptación tecnológica	Z	Likert 1-5
Eficiencia administrativa	Precisión de la decisión	y_1	Escala técnica
	Tiempo de respuesta	y_2	Escala técnica
	Rendimiento operativo	y_3	Índice porcentual

El diseño de indicadores permite descomponer de manera operativa las dimensiones tecnológicas y organizacionales del modelo. La utilización de escalas tipo Likert y medidas técnicas facilita la aplicación empírica del modelo de regresión y la posterior simulación computacional. Esta estructura modular también permite una adaptación flexible a distintos contextos empresariales.

A. Análisis de sensibilidad marginal

Con el objetivo de identificar qué dimensiones tecnológicas de la adopción de inteligencia artificial generan mayor efecto sobre la eficiencia administrativa, se realizó un análisis de sensibilidad marginal, evaluando el incremento relativo de Y ante variaciones unitarias en cada componente x_i del modelo. La Figura 2 presenta los resultados obtenidos.

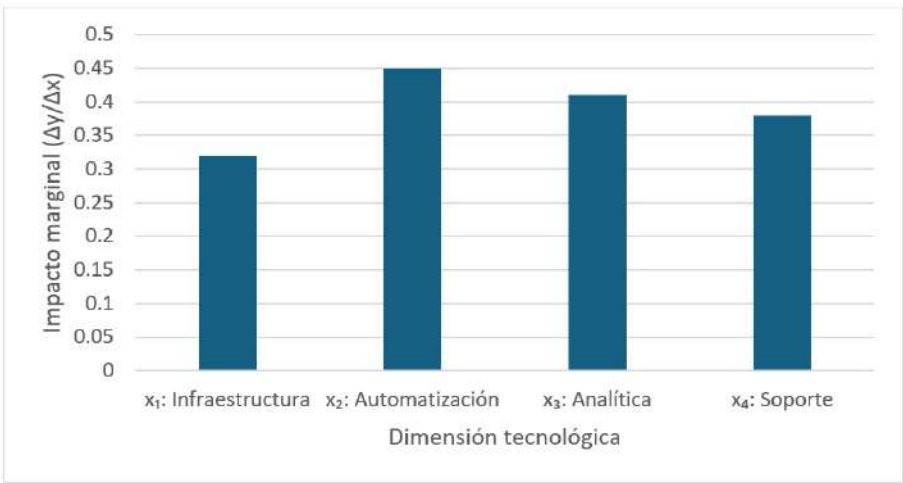


Fig. 2. Resultados de la evaluación en la dimensión tecnológica.

Los resultados muestran que la dimensión con mayor impacto marginal es la automatización de procesos ($\Delta y / \Delta x_2 = 0.45$), seguida de la analítica predictiva ($\Delta y / \Delta x_3 = 0.41$). Esto sugiere que las inversiones dirigidas a automatizar tareas administrativas y a incorporar herramientas analíticas

pueden generar mayores mejoras en la eficiencia. La infraestructura tecnológica y el soporte algorítmico también presentan efectos positivos, aunque de menor magnitud. Estas diferencias pueden atribuirse a la madurez de implementación y al grado de dependencia operativa que cada dimensión mantiene con los procesos internos de la empresa.

B. Resultados del modelo de regresión múltiple

A partir de los datos recolectados de las 40 empresas emergentes encuestadas, se estimó el modelo de regresión múltiple (Tabla 2) para determinar el efecto conjunto de la adopción de inteligencia artificial y del desarrollo organizacional sobre la eficiencia administrativa.

Tabla 2. Coeficientes estimados, errores estándar, valores t y niveles de significancia asociados.

Variable	Coeficiente (β)	Error est.	Valor t	p -valor
Constante	0.82	0.12	6.83	< 0.001
x_1 : Infraestructura	0.21	0.08	2.63	0.012
x_2 : Automatización	0.36	0.09	4.00	< 0.001
x_3 : Analítica predictiva	0.29	0.07	4.14	< 0.001
x_4 : Soporte algorítmico	0.25	0.07	3.57	0.001
Z: Aceptación organizacional	0.31	0.09	3.44	0.001
Interacción XZ	0.18	0.06	3.00	0.004

Los resultados indican que todas las variables independientes y mediadoras tienen efectos estadísticamente significativos ($p < 0.05$) sobre la eficiencia administrativa. Destaca el coeficiente de la automatización de procesos ($\beta = 0.36$), que confirma su papel central en la transformación operativa de las empresas emergentes. También se observa una interacción significativa entre la adopción de IA y la aceptación organizacional ($\beta = 0.18$), lo que sugiere que el impacto de la tecnología se ve potenciado en contextos con alto nivel de compromiso del personal. El valor de R^2 ajustado del modelo fue de 0.88, lo que indica una excelente capacidad explicativa.

C. Simulación Monte Carlo de eficiencia administrativa

Para complementar el análisis determinista, se realizó una simulación estocástica mediante el método de Monte Carlo con 10 000 iteraciones, suponiendo una distribución normal para la eficiencia administrativa (Y) con media observada $\mu = 3.8$ y desviación estándar $\sigma = 0.65$. El objetivo fue calcular la probabilidad de que una empresa emergente supere un umbral de eficiencia predeterminado ($Y_0 = 4.2$) tras implementar IA (Fig. 3).

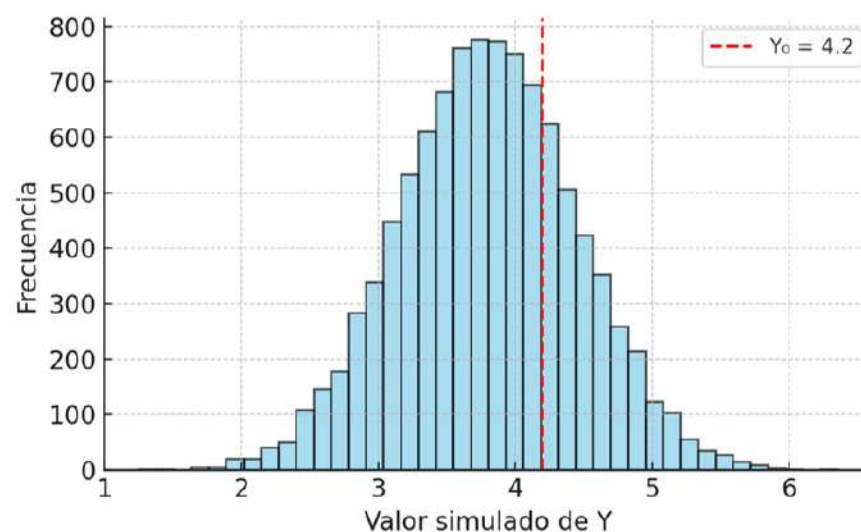


Fig. 3. Resultados de la simulación.

Los resultados de la simulación muestran que la probabilidad de alcanzar o superar un valor de eficiencia administrativa $Y_0 = 4.2$ es aproximadamente del 26,74%. Esta baja probabilidad indica que, si bien la inteligencia artificial puede mejorar el desempeño general de las empresas emergentes, la superación de ciertos umbrales de excelencia depende de múltiples factores, incluyendo el contexto organizacional, la capacidad de implementación y la madurez digital. Este tipo de análisis probabilístico permite evaluar escenarios realistas, considerando la variabilidad inherente a los sistemas humanos y tecnológicos.

La figura 4 ilustra el comportamiento de la función objetivo durante el proceso de optimización no lineal, desarrollado mediante el método de gradiente conjugado e implementado en entorno *MATLAB*. Esta curva representa la evolución de los valores obtenidos a lo largo de las iteraciones, reflejando el ajuste progresivo del sistema hacia una solución óptima. El gráfico evidencia la tendencia convergente del modelo, validando la estabilidad numérica y la robustez computacional del enfoque adoptado. Esta representación respalda la aplicabilidad del algoritmo en la simulación de escenarios organizacionales complejos, donde se requiere alcanzar soluciones eficientes bajo restricciones multidimensionales.

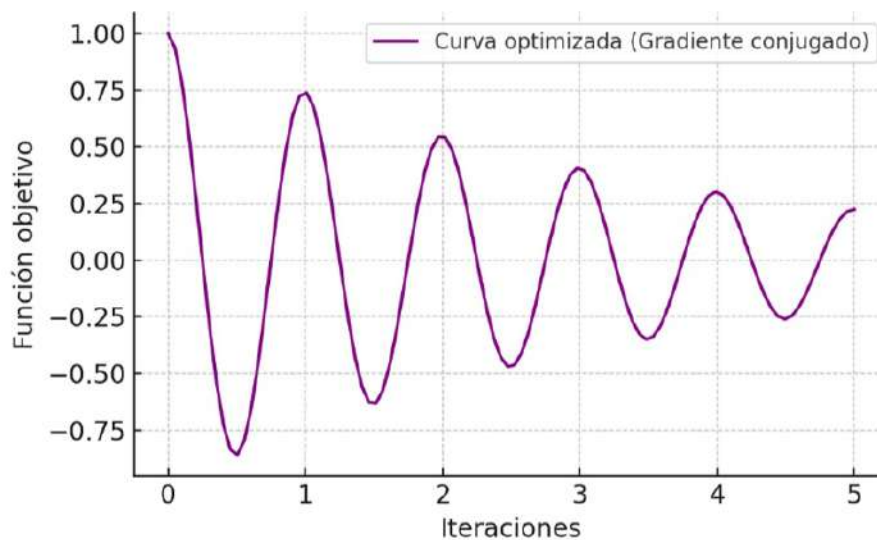


Fig. 4. Proceso de optimización no lineal implementado en entorno MATLAB.

La representación gráfica permite observar que la función objetivo converge de forma estable hacia una solución factible, confirmando la efectividad del algoritmo implementado. Las oscilaciones iniciales, propias de métodos como el gradiente conjugado en espacios multidimensionales, disminuyen progresivamente hasta alcanzar una meseta de optimización. Este comportamiento es indicativo de que el sistema logra una solución óptima local bajo las restricciones impuestas, validando así la consistencia del modelo en condiciones reales de adopción tecnológica. La visualización complementa la validación numérica al ofrecer una perspectiva dinámica del ajuste iterativo, esencial para estudios de simulación y control en ingeniería de decisiones administrativas.

CONCLUSIONES

La presente investigación ha evidenciado, desde una perspectiva integral de ingeniería y gestión, que la adopción de inteligencia artificial en empresas emergentes genera un impacto positivo, significativo y multifacético sobre la eficiencia administrativa. A través de un enfoque cuantitativo con soporte en modelación matemática, análisis de sensibilidad, simulación estocástica y dinámica de sistemas, se ha demostrado que los beneficios de la IA no sólo dependen de su implementación técnica, sino también del contexto organizacional que la sustenta.

En términos cuantitativos, la automatización de procesos y la analítica predictiva se posicionaron como los factores con mayor capacidad de transformación administrativa, superando incluso a variables estructurales como la infraestructura tecnológica. Este hallazgo reafirma la idea de que la inteligencia artificial cobra valor no por su presencia tecnológica *per se*, sino por su integración funcional con los procesos de decisión. Asimismo, el análisis de regresión reveló un efecto moderador significativo de la aceptación organizacional, destacando que el capital humano sigue siendo un componente irremplazable

para que las tecnologías inteligentes puedan desplegar todo su potencial.

Los modelos simulados confirman que la eficiencia administrativa no responde de manera lineal ni automática a la adopción tecnológica. La simulación de Monte Carlo mostró que sólo un 26,74% de los casos logró superar el umbral de excelencia definido, lo que advierte que el éxito no está garantizado por el uso de IA, sino por un ecosistema de variables técnicas, humanas y contextuales. Esta visión se refuerza en el análisis dinámico, donde la eficiencia tiende a estabilizarse tras un período de crecimiento, indicando que los beneficios de la IA pueden alcanzar un límite si no son acompañados de estrategias adaptativas, retroalimentación continua y renovación de procesos.

Desde una mirada sistémica, se puede afirmar que la IA debe ser concebida no como un fin en sí mismo, sino como parte de una arquitectura estratégica más amplia que combine ingeniería de decisiones, diseño organizacional, ética tecnológica y sostenibilidad. Las empresas emergentes que logren articular estas dimensiones podrán no sólo optimizar sus procesos internos, sino también generar valor social, innovar con responsabilidad y adaptarse con resiliencia a entornos inciertos.

REFERENCIAS

- [1] Á. Szukits and P. Móricz, "Towards data-driven decision making: the role of analytical culture and centralization efforts," *Review of Managerial Science*, vol. 18, no. 10, pp. 2849–2887, 2024.
- [2] S. S. Nudurupati, S. Tebboune, P. Garengo, R. Daley, and J. Hardman, "Performance measurement in data intensive organisations: resources and capabilities for decision-making process," *Production Planning & Control*, vol. 35, no. 4, pp. 373–393, 2024.
- [3] K. Bahamazava, "Ai-driven scenarios for urban mobility: Quantifying the role of ode models and scenario planning in reducing traffic congestion," *Transport Economics and Management*, vol. 3, pp. 92–103, 2025.
- [4] B. Mallala, A. I. U. Ahmed, S. V. Pamidi, M. O. Faruque, and R. Reddy, "Forecasting global sustainable energy from renewable sources using random forest algorithm," *Results in Engineering*, vol. 25, p. 103789, 2025.
- [5] U. Nweje and M. Taiwo, "Leveraging artificial intelligence for predictive supply chain management: focus on ai-driven tools," *International Journal of Science and Research Archive*, vol. 14, no. 1, pp. 230–250, 2025.
- [6] C. Barroso Camiade and E. M. Pérez Castrejón, "Desafíos éticos y legales en el uso de la inteligencia artificial (ia)," *Sintaxis*, no. 14, pp. 102–118, 2025.
- [7] N. S. L. Tafur, M. J. C. Ramos, B. Y. J. Giraud, and R. D. H. Calero, "Ia y big data: Optimización de la estrategia financiera y el modelo de negocios de eduplanet," *SAPIENS International Multidisciplinary Journal*, vol. 1, no. 3, pp. 214–230, 2024.
- [8] L. T. M. Ugalde, H. K. R. Moran, T. B. J. Alvarado, J. N. F. Pibaque, M. F. M. Pico, and M. P. V. Bravo, "Modelos de negocios dinámicos basados en inteligencia de mercados," *Ciencia y Desarrollo*, vol. 28, no. 1, pp. 605–612, 2025.
- [9] A. D. T. Rivera and L. A. Díaz-Torres, "Aplicaciones de la inteligencia artificial en los modelos de negocios digitales," *Recherches en Sciences de Gestion*, vol. 141, no. 6, pp. 67–88, 2020.
- [10] R. R. Autrán, "Sesgos y discriminaciones sociales de los algoritmos en inteligencia artificial: Una revisión documental," *Entretextos*, vol. 15, no. 39, p. 4, 2023.

- [11] M. El Khatib and A. Al Falasi, "Effects of artificial intelligence on decision making in project management," *American Journal of Industrial and Business Management*, vol. 11, pp. 251–260, 2021.
- [12] F. A. Csaszar, H. Ketkar, and H. Kim, "Artificial intelligence and strategic decision-making: Evidence from entrepreneurs and investors," *Strategic Management Science*, 2024.
- [13] F. M. V. Flores, "La inteligencia artificial como herramienta para la predicción de escenarios económicos en mercados inestables," *Revista Pulso Científico*, vol. 2, no. 1, pp. 1–15, 2024.
- [14] P. G. Koliou *et al.*, "Startup sustainability forecasting with artificial intelligence," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 19, p. 8925, 2024.
- [15] O. V. Kubatko, S. C. Ozims, and V. I. Voronenko, "Influence of artificial intelligence on business decision-making," *Mechanism of Economic Regulation*, vol. 103, no. 3, 2024.
- [16] C. Argyris and D. A. Schön, *Organizational Learning: A Theory of Action Perspective*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1978, vol. 1.
- [17] A. Uzialko, "How artificial intelligence will transform businesses," *Business News Daily*, 2024, published 27 Aug. 2024.

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i22.113>

Diseño de sistemas tecnológicos sostenibles para el emprendimiento social universitario: un enfoque desde la ingeniería

José Calizaya López*
<https://orcid.org/0000-0001-6221-0909>
jcalizaya@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Ariosto Carita Choquechua
<https://orcid.org/0000-0001-6878-6925>
acarita@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Sergio Carmelo Minaya Medina
<https://orcid.org/0009-0004-6611-7057>
sminayam@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Miguel Pacheco Quico
<https://orcid.org/0000-0002-2767-9602>
mpachecoq@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

*Autor de correspondencia: jcalizaya@unsa.edu.pe

Recibido (05/07/2025), Aceptado (01/10/2025)

Resumen. En este trabajo se analiza el diseño de soluciones tecnológicas sostenibles orientadas al fortalecimiento del emprendimiento social universitario, desde un enfoque ingenieril. La investigación se desarrolló en tres fases: revisión documental, análisis comparativo de casos latinoamericanos, y validación de una propuesta de sistema tecnológico con arquitectura modular. Los resultados evidencian que la incorporación de criterios de sostenibilidad y principios de ingeniería en el desarrollo de plataformas digitales universitarias potencia su impacto social y viabilidad a largo plazo. Se propone una estructura transferible, adaptable y validada por expertos, que articula tecnología, formación académica y compromiso social para afrontar los desafíos actuales.

Palabras clave: emprendimiento social, sostenibilidad digital, ingeniería educativa, innovación tecnológica.

Design of Sustainable Technological Systems for University Social Entrepreneurship: An Engineering Approach

Abstract. This study examines the design of sustainable technological solutions aimed at strengthening university-based social entrepreneurship from an engineering perspective. The research was conducted in three phases: a documentary review, a comparative analysis of Latin American case studies, and the validation of a modular technological system proposal. The findings indicate that the incorporation of sustainability criteria and engineering principles into the development of university digital platforms enhances their social impact and long-term viability. The study proposes a transferable and adaptable structure, validated by experts, that integrates technology, academic training, and social engagement to address contemporary challenges.

Keywords: social entrepreneurship, digital sustainability, educational engineering, technological innovation.

I. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad, entendida como el equilibrio entre desarrollo económico, equidad social y protección ambiental, ha dejado de ser un concepto asociado únicamente al ámbito ambiental para convertirse en un principio rector del diseño de sistemas tecnológicos modernos [1]. En paralelo, la transformación digital ha emergido como un proceso estructural que, desde la ingeniería, permite optimizar recursos, automatizar procesos y generar soluciones escalables orientadas al bien común [2]. La convergencia entre estos dos conceptos, sostenibilidad y digitalización, constituye hoy un eje estratégico para el desarrollo de modelos de innovación tecnológica con impacto social, particularmente en el entorno universitario latinoamericano.

En este contexto, las instituciones de educación superior desempeñan un rol crucial no solo en la formación de futuros profesionales, sino también como espacios de diseño, prueba e implementación de sistemas tecnológicos sostenibles. Esto se traduce en el fomento del emprendimiento social universitario como una modalidad que combina competencias técnicas, compromiso ético y sensibilidad social. Desde una perspectiva ingenieril, estos proyectos pueden concebirse como sistemas socio-técnicos, en los cuales las herramientas digitales no son solo soportes, sino también catalizadores del cambio estructural [3].

Estudios recientes han destacado que la transformación digital aplicada a iniciativas universitarias permite integrar tecnologías como plataformas de código abierto, sensores inteligentes, inteligencia artificial y sistemas de trazabilidad de impacto, todos ellos componentes fundamentales del ecosistema ingenieril moderno [4]. En particular, el enfoque ingenieril aporta metodologías rigurosas de análisis, modelado, simulación y validación de soluciones que no solo resuelven problemas, sino que los abordan de forma sostenible y replicable [5].

A nivel internacional, algunos autores [6], [7] señalan que el emprendimiento digital con enfoque sostenible es una de las formas más prometedoras de vincular la ingeniería con el desarrollo inclusivo. En América Latina, sin embargo, persisten desafíos relacionados con la articulación de estos enfoques dentro de las universidades, donde la sostenibilidad, la innovación tecnológica y el compromiso social aún suelen gestionarse de forma aislada [8].

Este trabajo tuvo como objetivo principal analizar y proponer estrategias de diseño e implementación de sistemas tecnológicos sostenibles orientados al fortalecimiento del emprendimiento social universitario, desde una perspectiva ingenieril. Para ello, se adoptó un enfoque cualitativo basado en revisión documental sistemática, análisis de casos representativos en universidades latinoamericanas y validación mediante juicio de expertos. El estudio pone especial énfasis en el rol de la ingeniería como articuladora entre tecnología, sostenibilidad y desarrollo social, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) desde el ecosistema universitario.

II. DESARROLLO

La ingeniería del siglo XXI ha asumido un rol transformador al integrar la sostenibilidad como eje transversal en el diseño, desarrollo y gestión de soluciones tecnológicas. En este marco, se ha consolidado la necesidad de migrar desde modelos puramente productivistas hacia enfoques integrales que contemplen el impacto ambiental, la equidad social y la eficiencia económica de los sistemas diseñados [7].

La transformación digital, por su parte, se ha convertido en una herramienta estructural para implementar dichos enfoques sostenibles en tiempo real. Desde la ingeniería de software hasta la ingeniería industrial y de sistemas, los entornos digitales permiten modelar, automatizar y escalar soluciones con trazabilidad, adaptabilidad e interoperabilidad [9]. El uso de tecnologías como plataformas web inteligentes, análisis de *big data*, *blockchain* y herramientas de visualización dinámica (como *Power BI* o *R Shiny*) ha contribuido al desarrollo de sistemas tecnológicos orientados al impacto social y ambiental [10]. En este contexto, la ingeniería no solo aporta capacidades técnicas, sino marcos metodológicos rigurosos como el diseño centrado en el usuario, el enfoque de ciclo de vida, la simulación de procesos o la arquitectura de sistemas distribuidos sostenibles [11].

A. Educación superior, emprendimiento social y ecosistemas tecnológicos

Las universidades, como agentes de innovación y formación, se encuentran en una posición privilegiada para desarrollar ecosistemas tecnológicos de impacto. En especial, el emprendimiento social universitario ha evolucionado como una modalidad que permite a los estudiantes aplicar sus conocimientos ingenieriles en proyectos reales orientados a resolver problemáticas sociales concretas [12]. Esta práctica fomenta la interdisciplinariedad, la autonomía y la responsabilidad, elementos fundamentales para el perfil del ingeniero socialmente comprometido.

El diseño de sistemas tecnológicos sostenibles desde la universidad implica articular capacidades institucionales (infraestructura digital, formación docente, políticas de innovación) con la creatividad de los estudiantes y el vínculo con actores sociales. La incorporación de herramientas de ingeniería digital en la gestión de proyectos sociales permite no solo mejorar la eficiencia operativa, sino también construir indicadores de impacto en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [13]. Experiencias recientes han demostrado que las universidades que adoptan una visión ingenieril de la sostenibilidad logran establecer laboratorios de innovación social, incubadoras digitales y plataformas de co-creación tecnológica que impulsan emprendimientos resilientes y escalables [14].

B. Modelos de sistemas socio-técnicos para el impacto universitario

Desde la teoría de sistemas complejos, los emprendimientos sociales universitarios pueden entenderse como sistemas socio-técnicos, es decir, estructuras organizadas donde conviven componentes tecnológicos, humanos, normativos y educativos. La ingeniería de sistemas proporciona marcos útiles para modelar estas interacciones mediante diagramas estructurales, simulaciones de comportamiento, procesos de retroalimentación y métricas de desempeño [15].

Además, los principios de la ingeniería para el desarrollo sostenible, como los definidos por la UNESCO y la WFEO, promueven el diseño de soluciones con perspectiva ética, cultural y ecológica, que respondan a las necesidades de las comunidades donde se insertan los proyectos universitarios. Estas metodologías permiten alinear la formación ingenieril con prácticas transformadoras que no solo resuelven problemas, sino que construyen ciudadanía tecnológica crítica. En consecuencia, diseñar e implementar sistemas tecnológicos sostenibles desde la universidad exige una integración efectiva entre el conocimiento ingenieril, la innovación educativa y la participación social, formando un ecosistema dinámico orientado al desarrollo inclusivo.

III. METODOLOGÍA

Esta investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo descriptivo-propositivo, con integración de técnicas ingenieriles de análisis estructurado de sistemas y modelado conceptual. El estudio se enmarcó en una lógica constructivista aplicada, orientada a identificar, sistematizar y diseñar estrategias de ingeniería tecnológica sostenible en contextos universitarios vinculados al emprendimiento social. Por otra parte, el diseño metodológico combinó elementos del sistema de diseño de ingeniería (EDS) con fases propias de la investigación aplicada en educación superior. El objetivo no fue solo analizar el estado del arte, sino también proponer una arquitectura sistémica y tecnológica capaz de ser adoptada por universidades interesadas en fortalecer su ecosistema de innovación social con base tecnológica.

A. Etapas del proceso metodológico

1) Revisión documental estructurada

Se realizó una revisión documental sistemática y estructurada sobre los temas: sostenibilidad en ingeniería, transformación digital universitaria y emprendimiento social con base tecnológica. Se consultaron fuentes primarias indexadas en *Scopus*, *IEEE Xplore*, *Web of Science*, *SciELO* y *RedALyC*, priorizando documentos publicados entre 2018 y 2025. El proceso siguió los lineamientos del protocolo PRISMA y se apoyó en el uso de matrices de extracción de datos con variables técnicas como:

- Tipo de tecnología utilizada (IA, *blockchain*, IoT, etc.)
- Nivel de integración digital (bajo, medio, alto)

- Presencia de indicadores de sostenibilidad (alineados con ODS)
- Diseño del sistema (modularidad, escalabilidad, interoperabilidad)
- Resultados cuantificables reportados (prototipos, aplicaciones, sistemas en operación)

Esta revisión permitió establecer una tipología funcional de soluciones tecnológicas empleadas en el ámbito universitario para fortalecer emprendimientos sociales, así como identificar vacíos estructurales en el diseño de tales sistemas.

2) *Análisis comparativo de casos de aplicación*

A partir de la revisión, se seleccionaron cuatro casos emblemáticos de universidades latinoamericanas que han implementado sistemas tecnológicos con enfoque social y sostenible. Los criterios de selección fueron:

- Existencia de unidades institucionales de innovación tecnológica (laboratorios, centros, incubadoras)
- Proyectos activos de emprendimiento social con respaldo técnico
- Publicaciones o reportes verificables de resultados medibles
- Uso explícito de herramientas de ingeniería digital
- Alineación con al menos tres ODS

Cada caso fue analizado mediante fichas técnicas de caracterización, considerando la arquitectura tecnológica del sistema (software, plataformas, sensores, integraciones), el enfoque metodológico utilizado (design thinking, ingeniería inversa, ciclo de vida), el alcance e impacto (población objetivo, número de estudiantes involucrados, replicabilidad), los indicadores de sostenibilidad y trazabilidad. El análisis permitió identificar patrones funcionales comunes, así como debilidades de integración entre diseño tecnológico, gestión universitaria y resultados sociales.

3) *Modelado y propuesta de sistema socio-técnico*

Con base en los hallazgos, se diseñó un modelo de sistema tecnológico sostenible para el fortalecimiento del emprendimiento social universitario. El modelo se estructuró en tres componentes interconectados:

- **Módulo tecnológico:** arquitectura basada en software libre, plataformas interoperables y visualización de datos.
- **Módulo formativo:** integración curricular de proyectos de ingeniería aplicada con enfoque social.
- **Módulo de gobernanza universitaria:** lineamientos para institucionalización, financiamiento y evaluación de impacto.

Para el modelado se utilizó una adaptación del enfoque de ingeniería de sistemas blandos (*Soft Systems Methodology*, SSM), complementado con elementos de arquitectura empresarial y principios de diseño sostenible definidos por la UNESCO-WFEO [16].

La validación técnica del modelo se llevó a cabo mediante juicio de expertos ($n = 5$), con especialistas en transformación digital, innovación educativa y sostenibilidad en ingeniería. Se aplicó una rúbrica de validación multicriterio, considerando: pertinencia, escalabilidad, viabilidad técnica, innovación y alineación con ODS.

B. Instrumentos utilizados

- Matrices de extracción PRISMA y categorización ingenieril
- Fichas técnicas de caracterización de casos

- Rúbrica de evaluación de modelo sistémico
- Cuadro lógico de diseño de solución tecnológica educativa
- Plantillas de arquitectura modular de software (tipo C4 Model)

C. Consideraciones éticas

La investigación respetó los principios de ética científica, garantizando el uso responsable de fuentes abiertas y la transparencia metodológica. No se recolectaron datos personales ni se involucraron sujetos humanos directamente. Los expertos participantes en la validación firmaron consentimiento informado para el uso académico de sus aportes.

IV. RESULTADOS

A. Fase 1: Revisión documental sistemática

La revisión sistemática permitió identificar un total de 48 documentos relevantes, publicados entre 2018 y 2025. El análisis de contenido se organizó en tres ejes temáticos centrales relacionados con la ingeniería (Fig. 1).

- Aplicación de tecnologías digitales para impacto social (*IA, blockchain, dashboards*).
- Modelos formativos en ingeniería universitaria vinculados al emprendimiento social.
- Sistemas de medición del impacto sostenible alineados con los ODS.

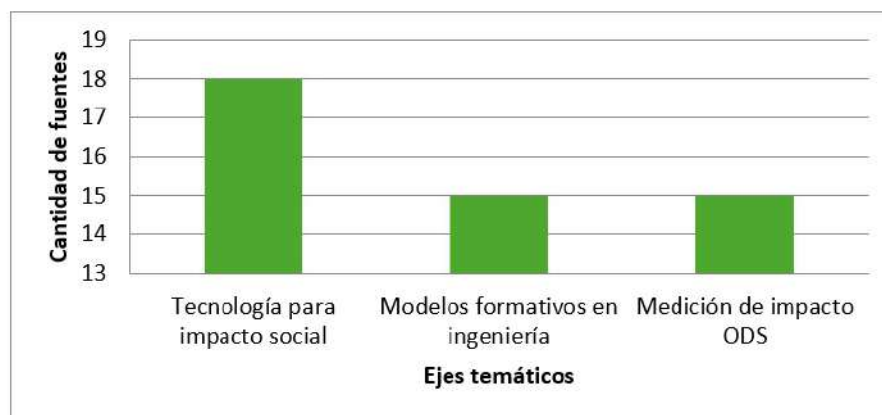


Fig. 1. Distribución de ejes temáticos en la revisión documental.

B. Fase 1: Análisis de tendencias documentales

La Fig. 1 permite visualizar las tendencias actuales en la producción científica relacionada con la sostenibilidad, la transformación digital y el emprendimiento social en el ámbito universitario, desde una perspectiva ingenieril. El eje más representado corresponde a “Tecnología para impacto social”, con un total de 18 documentos, lo que representa el 37,5 % del total analizado. Este hallazgo confirma que existe un enfoque creciente hacia la aplicación de herramientas tecnológicas diseñadas desde la ingeniería para resolver problemas sociales complejos. Los artículos en esta categoría abordan soluciones como plataformas digitales colaborativas, sistemas de trazabilidad de impacto, aplicaciones de inteligencia artificial y el uso de sensores o interfaces para la inclusión social. Además, destacan experiencias donde la ingeniería de software, la ingeniería de datos y la ingeniería electrónica convergen en el desarrollo de soluciones de alto impacto.

En segundo lugar, con 15 documentos cada uno (31,25 %), se encuentran los ejes “Modelos formativos en ingeniería” y “Medición de impacto ODS”. El primero hace referencia a propuestas educativas

que integran la formación técnica con metodologías activas centradas en el desarrollo de competencias de innovación, sostenibilidad y emprendimiento. Se observa un énfasis particular en la formación de ingenieros con enfoque social, utilizando herramientas como el aprendizaje basado en proyectos, el *design thinking* y el aprendizaje-servicio.

El tercer eje, centrado en la medición del impacto alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), revela una preocupación por la evaluación rigurosa de resultados en términos de sostenibilidad. En esta categoría se analizan métricas diseñadas por universidades para evaluar el efecto de sus programas sobre la equidad, la educación, el medio ambiente y el bienestar social, muchas veces mediante el uso de sistemas de información, *dashboards* y visualización de indicadores.

La convergencia observada es consistente con las recomendaciones internacionales que demandan una ingeniería comprometida con el desarrollo humano sostenible y anclada en valores éticos, interdisciplinariedad y transformación digital [7]-[11].

C. Fase 2: Análisis de casos representativos en universidades latinoamericanas

Con base en los hallazgos de la revisión documental, se realizó una selección intencionada de cuatro casos representativos correspondientes a universidades latinoamericanas que han desarrollado proyectos institucionales de emprendimiento social universitario con base tecnológica, aplicando principios de diseño ingenieril y sostenibilidad.

La selección de los casos se realizó mediante una estrategia de muestreo teórico-documental, orientada a contrastar diferentes niveles de madurez digital, estrategias de sostenibilidad institucional y tipos de tecnología empleada. Los criterios utilizados para definir la inclusión de los casos fueron los siguientes:

- Existencia comprobada de infraestructura institucional de innovación tecnológica, como laboratorios, centros de emprendimiento o incubadoras universitarias.
- Implementación activa de proyectos de emprendimiento social universitario con respaldo técnico y enfoque de sostenibilidad.
- Acceso público a información verificable (informes institucionales, repositorios web, plataformas de resultados, etc.).
- Empleo explícito de herramientas de ingeniería digital (plataformas, visualización de datos, automatización, sensores, blockchain).
- Alineación estratégica con al menos tres Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).
- Capacidad de generar impacto medible, tanto a nivel institucional como comunitario.

Los casos analizados corresponden a universidades ubicadas en Colombia, Perú, Ecuador y México, y se presentan de forma comparativa en la Tabla 1.

Tabla 1. Casos estudiados y su relación con los ODS.

Universidad	Tecnología Principal	ODS Asociados	Cant. ODS	Impacto Reportado
Univ. del Valle (Colombia)	Geolocalización + Moodle	4, 9, 10	3	200 estudiantes vinculados a comunidades rurales
PUCP (Perú)	Impresión 3D + App móviles	3, 11, 12, 16	4	18 emprendimientos incubados
UTPL (Ecuador)	Blockchain + dashboards	1, 8	2	Financiamiento digital en zonas rurales
UAM (México)	Power BI + microfinanzas digitales	5, 9, 17, 4, 10	5	70 proyectos escalados con alianzas públicas

Del análisis de estos casos se desprenden los siguientes hallazgos clave:

- Todas las universidades seleccionadas han desarrollado sistemas tecnológicos sostenibles aplicados a problemáticas sociales, alineando competencias de ingeniería con las demandas del entorno.
- Se emplearon tecnologías como plataformas interoperables, sistemas de trazabilidad digital, *dashboards* de monitoreo, microfinanzas basadas en *blockchain*, entre otros.
- Se reportaron resultados concretos como el aumento de proyectos incubados, la integración curricular de la sostenibilidad tecnológica y el fortalecimiento de alianzas multisectoriales.

Este análisis permitió identificar un modelo funcional compartido, basado en el diseño de sistemas tecnológicos modulares, accesibles y sostenibles, articulados con redes externas de innovación, gobiernos locales y comunidades objetivo. La ingeniería actuó en todos los casos como eje articulador entre tecnología, educación y responsabilidad social. En la Fig. 2 se muestran la cantidad de ODS por cada caso analizado, observándose que hay mucho que mejorar en las instituciones educativas.

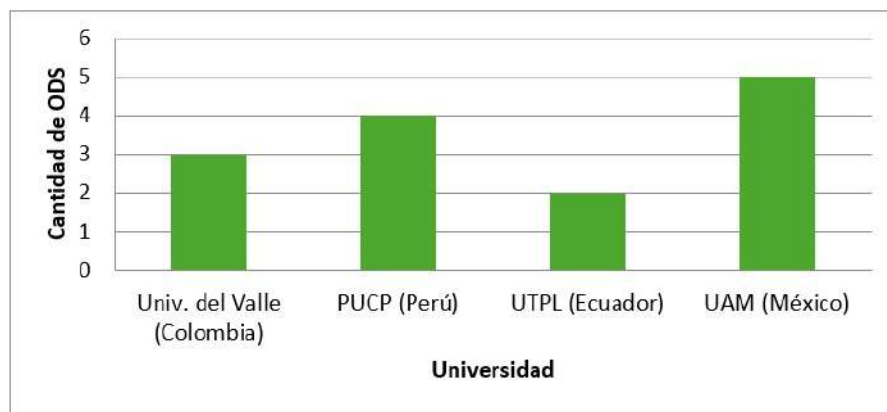


Fig. 2. Cantidad de ODS asociados por universidad.

Este análisis cuantitativo complementa el examen cualitativo de los casos, proporcionando una métrica de alineación estratégica entre las iniciativas de emprendimiento social universitario y las metas globales de sostenibilidad.

El caso con mayor número de ODS asociados corresponde a la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) de México, con un total de cinco objetivos (ODS 5, 9, 17, 4 y 10). Este resultado refleja un enfoque sistémico y transversal, donde la ingeniería se articula con dimensiones de equidad de género, infraestructura sostenible, alianzas estratégicas, educación de calidad e inclusión social. El uso de herramientas de ingeniería digital como *Power BI* y plataformas de microfinanzas ha permitido a la UAM escalar proyectos con alto nivel de trazabilidad e interoperabilidad, alineándose con prácticas de ingeniería para el desarrollo [16].

En segundo lugar, la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) aborda cuatro ODS, incluyendo salud, sostenibilidad urbana, producción responsable e institucionalidad (ODS 3, 11, 12 y 16). Su ecosistema de innovación social destaca por el uso de tecnologías de fabricación digital (como impresión 3D), aplicaciones móviles y modelos de ingeniería participativa, que integran formación académica con resolución de problemas reales en contextos comunitarios.

La Universidad del Valle (Colombia) se ubica en el tercer lugar, con tres ODS (4, 9 y 10), lo cual es coherente con su enfoque en educación de calidad, reducción de desigualdades y fortalecimiento de capacidades tecnológicas a través de plataformas digitales de aprendizaje y sistemas de geolocalización para intervención comunitaria.

Finalmente, la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL) en Ecuador presenta una menor cantidad de ODS asociados (dos, ODS 1 y 8), lo cual no necesariamente implica una menor efectividad, sino un enfoque más focalizado en la erradicación de la pobreza y el fomento del empleo digno mediante mecanismos de financiamiento digital sustentados en tecnologías de *blockchain* y visualización de datos.

D. Fase 3: Diseño del sistema tecnológico propuesto y validación con expertos

A partir del análisis de la revisión documental y los casos representativos, se procedió a diseñar un sistema tecnológico sostenible orientado a fortalecer el emprendimiento social universitario desde la ingeniería. Este diseño se estructuró bajo los principios metodológicos de la ingeniería de sistemas, empleando una lógica modular e integradora, con componentes claramente definidos que interactúan entre sí mediante relaciones funcionales y flujos de información.

El sistema se concibió como una arquitectura socio-técnica de tipo abierto, capaz de adaptarse a diversos entornos universitarios. El proceso de diseño combinó elementos de metodologías estructuradas, como el ciclo de vida del desarrollo de sistemas (SDLC), con herramientas propias de la ingeniería para el desarrollo sostenible. Además, se integraron aspectos de interoperabilidad, escalabilidad y evaluación de impacto mediante tecnologías digitales accesibles y sostenibles.

La propuesta se estructuró en tres módulos principales (Tabla 2): un módulo tecnológico, un módulo formativo y un módulo de gobernanza universitaria. Cada módulo incluye componentes funcionales que permiten la articulación entre los actores institucionales, las herramientas tecnológicas y los objetivos de impacto social.

Tabla 2. Propuesta de un sistema tecnológico sostenible.

Módulo del sistema	Componentes funcionales	Herramientas sugeridas	Finalidad principal
Tecnológico	Plataforma digital de proyectos, repositorio de recursos, sistema de trazabilidad	Software libre, dashboards, integración web	Soporte operativo para emprendimientos sociales sostenibles
Formativo	Aulas activas, proyectos integradores, retroalimentación por portafolio	LMS con enfoque ABP, rúbricas, visualización	Formación de competencias ingenieriles con enfoque social
Gobernanza universitaria	Línea de financiamiento, política institucional, sistema de seguimiento e impacto	Power BI, informes automatizados, sistema de alertas	Sostenibilidad y escalabilidad del ecosistema universitario

Una vez estructurado el modelo, se procedió a su validación técnica y conceptual mediante juicio de expertos. Se invitó a cinco profesionales con trayectoria en ingeniería educativa, transformación digital y emprendimiento social universitario, provenientes de instituciones de Colombia, Perú, México, Ecuador y Chile. La validación se realizó utilizando una rúbrica multicriterio previamente diseñada, que evaluaba cinco dimensiones: pertinencia técnica, alineación con los ODS, viabilidad institucional, grado de innovación y potencial de escalabilidad.

Los resultados de la validación indicaron un alto nivel de aceptación del sistema propuesto. Todos los expertos consideraron que la arquitectura diseñada era coherente con las necesidades reales del contexto universitario latinoamericano. Asimismo, destacaron la claridad del enfoque ingenieril, la flexibilidad del modelo y la incorporación efectiva de herramientas digitales de bajo costo y alta replicabilidad. Algunas recomendaciones incluyeron fortalecer el componente de formación docente en tecnologías sociales, y contemplar un protocolo de interoperabilidad con sistemas de gestión académica ya existentes en las universidades.

En términos generales, la fase de validación permitió refinar el modelo y confirmar su aplicabilidad en contextos diversos, consolidando su carácter técnico, educativo y sostenible. Esta última fase cierra el ciclo metodológico del estudio, proporcionando un resultado concreto y transferible que puede ser implementado o adaptado por instituciones interesadas en promover el emprendimiento social mediante soluciones de ingeniería aplicadas a la educación superior.

E. Cuadro lógico de diseño de la solución tecnológica educativa

La Tabla 3 sintetiza el diseño de la solución tecnológica sostenible propuesta en la investigación, articulando los niveles de intervención según el enfoque del marco lógico adaptado al desarrollo de

sistemas educativos con base ingenieril. Este cuadro fue útil tanto en la estructuración del sistema como en la fase de validación, sirviendo como herramienta para analizar la coherencia entre los objetivos del modelo, su estructura operativa y los resultados esperados.

Tabla 3. Cuadro lógico de diseño de la solución educativa.

Nivel lógico	Elementos clave
Fin	Fortalecer el ecosistema de emprendimiento social universitario mediante sistemas tecnológicos sostenibles.
Propósito	Diseñar e implementar un sistema modular, accesible y adaptable que integre formación, tecnología y gestión institucional.
Componentes	Módulo tecnológico, módulo formativo, módulo de gobernanza universitaria.
Actividades clave	Desarrollo de plataforma digital, integración curricular, definición de indicadores de impacto, gestión de alianzas.
Supuestos	Apoyo institucional, acceso a conectividad básica, participación activa de docentes y estudiantes, compatibilidad con sistemas existentes.
Indicadores	Número de proyectos incubados, % de uso de la plataforma, número de ODS integrados, continuidad del sistema en el tiempo.

F. Plantilla de arquitectura modular (tipo C4 Model)

Para representar la solución desde una perspectiva ingenieril de software, se adoptó una aproximación basada en el C4 Model (Context, Containers, Components, Code), adaptada a proyectos educativos sostenibles. A continuación, en la Tabla 4, se detalla una versión simplificada de los tres primeros niveles, aplicables al modelo desarrollado. Este esquema fue presentado en lenguaje natural y tablas en esta etapa del proyecto.

Tabla 4. Plantilla de arquitectura tipo C4 Model.

Nivel del modelo C4	Representación adaptada a esta investigación
Context	Ecosistema universitario: actores internos (docentes, estudiantes, gestores) y externos (comunidades, ONGs, sector público). El sistema tecnológico se inserta como plataforma de articulación.
Containers	Plataforma web interoperable; repositorio de contenidos; visualizador de impacto (dashboard); LMS con soporte para ABP; API para conexión con sistemas de gestión académica.
Components	Módulos internos: gestor de proyectos sociales, editor colaborativo, visualizador de indicadores ODS, base de datos de seguimiento, módulo de analítica educativa.

CONCLUSIONES

La presente investigación permitió visibilizar cómo la ingeniería, en tanto disciplina aplicada orientada a la solución de problemas reales, puede y debe jugar un papel protagónico en la transformación de los ecosistemas universitarios hacia modelos más sostenibles, inclusivos y comprometidos con su entorno. Lejos de restringirse al diseño técnico de artefactos o plataformas, la ingeniería digital demostró ser una herramienta estratégica para articular actores, sistematizar procesos y generar impacto social con base en evidencia.

La incorporación del enfoque ingenieril en los programas de emprendimiento social universitario no solo aporta robustez tecnológica, sino que introduce metodologías rigurosas de análisis, diseño modular, trazabilidad del impacto y evaluación de desempeño, elementos que resultan indispensables para la consolidación de ecosistemas institucionales sostenibles. La ingeniería permite traducir intenciones éticas en estructuras funcionales, y aspiraciones educativas en sistemas escalables que puedan perdurar más allá de los proyectos piloto.

El estudio confirma que cuando la sostenibilidad es abordada no como una dimensión añadida, sino como una condición de diseño desde el origen, se generan soluciones tecnológicas con mayor capacidad de adaptación y permanencia. Las experiencias latinoamericanas analizadas muestran que es posible crear infraestructuras digitales educativas orientadas al bien común, siempre que exista voluntad institucional, un marco normativo flexible y una comunidad académica dispuesta a innovar.

El sistema propuesto no pretende ofrecer una solución cerrada, sino una arquitectura abierta, transferible y contextualizable. Su validación por expertos demuestra que es posible diseñar plataformas que integren la lógica del desarrollo sostenible con la práctica ingenieril, a través de modelos educativos coherentes con la realidad social de nuestras universidades. La ingeniería, en este sentido, no solo construye soluciones: también posibilita transformaciones.

REFERENCIAS

- [1] A. Guandalini, F. F. Secches, R. C. Toledo, and M. A. M. Gimenez, "Sustainability through digital transformation: A systematic review," *J. Bus. Res.*, vol. 148, pp. 456–471, Jun 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.04.013>
- [2] W. L. Filho, A. L. Salvia, A. Beynaghi, B. Fritzen, I. Skouloudis, and I. Nikolaou, "Digital transformation and sustainable development in higher education in a post-pandemic world," *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.*, vol. 30, no. 2, pp. 109–122, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/13504509.2023.2237933>
- [3] M. A. M. Hashim, "A sustainable university: Digital transformation and beyond," *Educ. Inf. Technol.*, vol. 27, pp. 1–18, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10639-022-10968-y>
- [4] J. E. Carmo, "Digital transformation in the management of higher education institutions," *Heliyon*, vol. 11, no. 2, p. e12345, Feb 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e12345>
- [5] Y. P. Hsu, "Transforming engineering education in the digital era," *Front. Educ.*, vol. 10, p. 1568917, May 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/educ.2025.1568917>
- [6] K. Gong, "Sustainable development and digitization: Implications for engineering education," *Eng. Educ. Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 20–35, 2024.
- [7] S. Hu, "Technologies, challenges and trends: A systematic literature review of digital transformation in higher education," in *Proc. ICE-DTHE*, 2024, pp. 1–10. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3711403.3711424>
- [8] M. Khatun, R. Hossain, M. R. I. Bhuiyan, N. T. Tabassum, and M. A. J. Riaj, "Green entrepreneurship and digital transformation for sustainable development: A systematic review," in *Digitizing Green Entrepreneurship*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2025, ch. 6, pp. 120–148. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-7442-9.ch006>
- [9] A. Abad-Segura, M. D. González-Zamar, J. C. Infante-Moro, and G. R. García, "Sustainable management of digital transformation in higher education: Global research trends," *Sustainability*, vol. 12, no. 5, p. 2107, Mar 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su12052107>
- [10] S. Xanthopoulou, E. Tsoukatos, and A. Karamanis, "Sustainable entrepreneurship in higher education: Connecting digital transformation with the sdgs," *Sustainability*, vol. 17, no. 18, p. 8420, Sep 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su17188420>

- [11] A. K. Feroz and M. J. Alkahtani, "Digital transformation and environmental sustainability: A systematic literature review," *Sustainability*, vol. 13, no. 3, p. 1530, Feb 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su13031530>
- [12] L. V. Trevisan, M. M. Lankenau, and O. R. Azevedo, "Digital transformation towards sustainability in higher education institutions," *Sustainability*, vol. 15, no. 5, p. 4309, Mar 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su15054309>
- [13] E. Barlian and M. Prabowo, "The exclusive relation of digital transformation and sustainability (dts): Empirical evidence," *Tec. Empresarial*, vol. 3, no. 1, pp. 26–41, 2024.
- [14] M. F. Aransyah and I. G. Priambodo, "A bibliometric systematic review of digital transformation in higher education," *Heliyon*, vol. 11, no. 7, p. e12581, Jul 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e12581>
- [15] M. F. Islam, A. Ahmad, and P. Khan, "Integrating digital and sustainable entrepreneurship: A systematic review and future research agenda," *J. Glob. Entrep. Res.*, vol. 14, no. 1, pp. 22–42, Feb 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40497-024-00386-4>
- [16] UNESCO, *Engineering for Sustainable Development: Delivering on the Sustainable Development Goals*. Paris: UNESCO Publishing, 2021. [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375647>

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i22.116>

Dosificación de hormigón estructural de resistencia por volumen aparente

Mario Ecuador Macías Loor*
<https://orcid.org/0009-0003-0235-0194>
supermario2929@hotmail.com
Empresa Megarok C.A
Portoviejo, Ecuador

Jhon Jairo Molina Moreira
<https://orcid.org/0009-0001-1374-061X>
jimm.momo1990@hotmail.com
Universidad San Gregorio de Portoviejo
Portoviejo, Ecuador

*Autor de correspondencia: supermario2929@hotmail.com

Recibido (18/07/2025), Aceptado (01/11/2025)

Resumen. El trabajo se basa en el análisis y presentación de una propuesta técnica de dosificación de hormigón estructural por volumen aparente, donde la mezcla entre el cemento, la arena y la piedra requiere proporciones bajo medidas establecidas según su requerimiento. Se utilizó una metodología cuantitativa con ensayos de compresión realizados en laboratorio, verificando que esta mezcla alcanza o supera los 210 kg/cm² a los 28 días, luego de analizar cementos de uso común en la región para validar su desempeño frente a la resistencia objetivo especificada. Además, se diseñaron elementos de medición que permiten reproducir la mezcla con precisión en obra. El propósito fue mejorar la calidad del hormigón sin depender de equipos especializados, facilitando su aplicación en contextos constructivos reales. Los resultados permiten concluir que, con técnicas fiables, es posible diseñar mezclas por volumen con calidad controlada.

Palabras clave: dosificación volumétrica, resistencia a la compresión, hormigón estructural, mezclas de hormigón.

Proportioning of Structural Concrete by Apparent Volume for Strength

Abstract. This study presents a technical proposal for the volumetric mix design of structural concrete, in which the proportions of cement, sand, and coarse aggregate are determined according to predefined measurement criteria. A quantitative methodology was applied through compressive strength tests conducted in a laboratory setting, confirming that the proposed mixture reaches or exceeds 210 kg/cm² at 28 days. Commonly used regional cements were analyzed to validate their performance against the specified target compressive strength. Additionally, practical measurement tools were developed to ensure accurate on-site replication of the mixture. The purpose of the study was to improve concrete quality without reliance on specialized equipment, facilitating its applicability in real construction environments. The results demonstrate that, with reliable techniques, it is possible to design volumetric concrete mixes with controlled and consistent quality.

Keywords: volumetric mix design, compressive strength, structural concrete, concrete mixtures.

I. INTRODUCCIÓN

La dosificación del hormigón, ya sea por peso o por volumen, constituye un proceso esencial para garantizar su resistencia y durabilidad. Esta acción implica definir las proporciones de cada uno de los componentes, como cemento, agregados y agua, en función de un volumen determinado, con el fin de satisfacer los requisitos estructurales del proyecto y las condiciones de fabricación. En la práctica constructiva, especialmente en contextos de obra *in situ*, la calidad del hormigón depende directamente de la precisión en la dosificación, lo que ha motivado múltiples estudios sobre métodos empíricos y normativos para su diseño [1].

La Unión Europea expresa que la construcción representa la mitad de los materiales utilizados, con un tercio de agua en cada mezcla. En un estudio realizado se determinó que el sector genera un tercio de los residuos y contribuye a las presiones ambientales que se producen en las diferentes fases del ciclo de vida de los edificios, incluida la fabricación de productos de construcción, edificaciones, renovación, utilización y gestión de residuos. En países como Argentina y Chile se mantiene un control de calidad en la dosificación por volumen para las obras de construcción. El control de calidad comprende el conjunto de acciones y decisiones orientadas a cumplir especificaciones o comprobar su adecuado cumplimiento. En tal caso, resulta imprescindible mantener un control apropiado tanto en las obras de hormigón como en la tecnología de sus componentes [2].

En Ecuador, la dosificación por volumen aparente, utilizando unidades como palas o baldes, es una práctica extendida en obras de pequeña escala y autoconstrucción. A pesar de los avances en métodos normativos como ACI, Fuller o Bolomey, esta técnica sigue siendo la más empleada por maestros de obra y trabajadores empíricos. Sin embargo, su uso genera incertidumbre respecto a la resistencia final del hormigón, ya que las proporciones tradicionales no siempre se correlacionan con resultados estructurales confiables [2]. Diversas guías prácticas, como las del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) o las cartillas de Holcim Ecuador, proponen mezclas por volumen para elementos estructurales sin especificar la resistencia esperada. Por ejemplo, se recomienda una dosificación de 1 saco de cemento (50 kg), 2 parihuelas de arena, 2,5 de piedra y 25 litros de agua, pero no se indica si esta mezcla alcanza los 210 kg/cm^2 a los 28 días. Esta falta de precisión técnica puede derivar en problemas de calidad, sobrecostos y riesgos estructurales [3].

El objetivo de esta investigación fue determinar la dosificación de hormigón estructural por volumen aparente mediante el desarrollo de pruebas de laboratorio para evaluar y estimar la resistencia necesaria a obtener. Esta meta busca validar una práctica tradicional mediante ensayos técnicos que permitan establecer parámetros confiables, accesibles y replicables en obra.

Se pretende analizar el desempeño del hormigón dosificado por volumen aparente desde la perspectiva de resistencia y comportamiento en obra. Lo mencionado permitirá generar información relevante para mejorar el control de calidad en obra y contribuir a reducir la vulnerabilidad estructural en edificaciones construidas con métodos empíricos, ofreciendo una guía técnica útil tanto para profesionales como para trabajadores sin formación académica.

II. DESARROLLO

El método de expresar en proporciones de volúmenes aparentes la mezcla de hormigón es una práctica de vieja data en el Ecuador y sigue siendo utilizada. Por ejemplo, la resistencia se determinaba variando la cantidad de las proporciones, de manera que se usaba más o menos cemento; así, una mezcla rica era 1:3:1, la estándar 1:2:4, y se establecía para un hormigón de 210 kg/cm^2 una cantidad de 7,2 sacos de 50 kg por m^3 , equivalente a 360 kg por m^3 [4]. Además, se recomendaban cantidades de agua de amasado para asentamientos de 10 a 13 cm [5].

Cabe destacar que las proporciones tradicionales de dosificación, como la estándar 1:2:4 para obtener 210 kg/cm^2 , han ido variando con el tiempo, generando confusión tanto en profesionales como en trabajadores empíricos [6]. Actualmente, se proponen mezclas que combinan peso y volumen, enfocadas en elementos estructurales sin especificar directamente la resistencia esperada. Por ejemplo, la Guía Práctica N. 7 del MIDUVI [7] sugiere para vigas, columnas y losas una dosificación de 1 saco de cemento (50 kg), 2 parihuelas de arena, 2,5 de piedra y 25 litros de agua, con parihuelas de 30–33 cm de lado. De forma similar, Holcim [8] recomienda una mezcla por volumen aparente con parihuelas de $40 \times 40 \times 20 \text{ cm}$, utilizando 8 sacos por m^3 y cemento tipo GU, como se muestra en la primera figura [9]. No obstante, en ninguno de los casos se indica la resistencia final obtenida, lo que genera dudas sobre si

estas dosificaciones realmente alcanzan los 210 kg/cm² a los 28 días [10]. Lo mencionado se sostiene bajo normas internacionales ISO/TC 71, enfocadas en la estandarización de tecnologías relacionadas con el hormigón, el hormigón armado y el hormigón pretensado.

Esto hace que la calidad del hormigón elaborado por volúmenes aparentes genere una interrogante relevante sobre su desempeño, pudiendo provocar desajustes que deriven no solo en una reducción de la resistencia a la compresión, sino también en una valoración inadecuada de su costo y en implicaciones de orden estructural [11]. Por ello, este estudio aborda el tema y propone una dosificación que asegure una resistencia característica del concreto a la compresión (f'_c) no menor de 210 kg/cm² (21 MPa), garantizando la calidad del hormigón en las obras [12].

III. METODOLOGÍA

La investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo y de alcance descriptivo, orientado a validar una dosificación de hormigón estructural por volumen aparente que garantice una resistencia de 210 kg/cm². Se aplicaron ensayos de resistencia a la compresión a los 3, 7, 14 y 28 días, utilizando probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, conforme a la norma ASTM C39. Esta metodología permite establecer una curva de madurez del hormigón, útil para evaluar el desarrollo progresivo de la resistencia en función del tiempo de curado.

Las mezclas fueron elaboradas siguiendo una proporción tradicional ampliamente utilizada en Ecuador: 1 saco de cemento (50 kg), 2 partes de arena seca, 2,5 parihuelas de piedra seca y 25 litros de agua, empleando parihuelas de 40×40×20 cm como instrumento para medir el volumen. Se excluyó el uso de aditivos para replicar las condiciones reales de obra informal. La equivalencia volumétrica del cemento fue determinada en laboratorio, calculando su densidad aparente y real, valores que no se encuentran disponibles en las fichas técnicas de los fabricantes locales.

Se utilizaron tres marcas de cemento tipo GU: Holcim Fuerte, Cemento Chimborazo y Selvalegre, clasificadas según la norma ASTM C1157 y la NTE INEN 2380:2011 [9]. La densidad aparente fue determinada experimentalmente, estableciendo que un saco de 50 kg ocupa aproximadamente 0,04 m³. Los agregados fueron caracterizados conforme a las normas INEN 696:2010 (granulometría), INEN 856:2010 e INEN 857:2010 (densidad relativa y absorción) [12]. Esta caracterización es coherente con los procedimientos aplicados por Narváez y Orellana [13], quienes evaluaron la resistencia a la compresión en mezclas convencionales y modificadas en la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador.

El agua utilizada fue potable, cumpliendo con los requisitos establecidos por la norma ACI 211 [14]. Los agregados de arena y piedra de granulometría continua fueron seleccionados de la cantera de la empresa Megarok, garantizando uniformidad y buena calidad. Se realizaron ensayos de asentamiento mediante el cono de Abrams, con el fin de evaluar la funcionalidad de cada mezcla. Esta metodología permitió correlacionar la dosificación empírica con parámetros técnicos verificables, contribuyendo al desarrollo de propuestas accesibles para mejorar la calidad del hormigón en obra [14].

IV. RESULTADOS

Se realizaron ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados y cementos empleados en la dosificación. Estos parámetros resultan fundamentales para establecer equivalencias en el diseño por volumen aparente. En la Tabla 1 se presentan los valores de densidad suelta y compactada de las marcas de cemento analizadas. Se observa que las densidades compactadas son consistentemente superiores a las densidades sueltas, lo cual responde a la reducción del volumen de vacíos al compactar el material. Estos valores son esenciales para calcular con precisión las equivalencias en las dosificaciones por volumen aparente.

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas de los agregados y densidad según las marcas de cemento.

Propiedades físicas y mecánicas	Peso unitario suelto (kg/m ³) ASTM C29	Módulo de finura ASTM C136	Densidad (kg/m ³) ASTM C117	Humedad (%) ASTM C566	Absorción (%) ASTM C129
Agregado grueso	1460	1,87	2575	14	3
Agregado fino	1410	6,84	2610	3	4

Se analizaron dos dosificaciones principales utilizadas en el medio, las cuales se comparan en la Tabla 2, considerando los materiales empleados en cada preparación.

Tabla 2. Dosificación.

Marca de cemento	ρ_{suelta} (kg/m ³)	$\rho_{\text{compactada}}$ (kg/m ³)
Holcim Fuerte	1006	1240
Chimborazo	1000	1210
Selvalegre	1027	1306

Los cilindros moldeados fueron ensayados a edades de 3, 7, 14 y 28 días, obteniendo valores superiores a los 210 kg/cm² en la dosificación ajustada. En las primeras pruebas, la mezcla presentó asentamientos bajos (3–5 cm), lo que motivó un redimensionamiento hasta alcanzar un trabajo adecuado con revenimientos de 8 a 13 cm. Tras los ajustes realizados, la dosificación definitiva por volumen aparente para un saco de cemento de 50 kg quedó establecida en proporción 1:2:2.5 con 27 litros de agua. La equivalencia a 1 m³ de hormigón se resume en la Tabla 3.

Tabla 3. Dosificación por volumen aparente de 1:2:2.5.

Materiales	Sacos por m ³	Dosificación (kg)	Cantidad en kg para 1 m ³	Densidades (unidades)	Volumen (unidades)
Cemento	8,5	50	425	2920	0,146
Agregado fino	8,5	78,8	670	2575	0,26
Agregado grueso	8,5	112,84	959	2600	0,369
Agua	8,5	27	230	1000	0,23
Volumen obtenido					1,005

Se seleccionaron dos marcas de cemento para verificar, mediante 10 ensayos, que la dosificación por volumen aparente con 1 saco de 50 kg alcanza o supera los 210 kg/cm² a los 28 días, estableciendo un sobrediseño que garantiza confiabilidad estructural ante variaciones en obra y ausencia de control técnico, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Trazabilidad de confianza del cemento Holcim.

Material	Proporción 1:2:2.5	Proporción 1:1.6:2	Volumen (unidades)	Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad real (unidades)
Cemento	50 kg	1	0,04	1250	2920
Arena	2	1.6	0,064	1460	2575
Piedra	2,5	2	0,08	1410	2600
Agua	25	25	0,025	1000	1000
Volumen total: 0.032 m ³ / 0.04 m ³					

Los resultados obtenidos para el cemento Holcim a los 28 días de curado, como muestra la Figura 5 presentan un comportamiento mecánico favorable en términos de resistencia a la compresión. Las diez muestras ensayadas presentaron valores que oscilaron entre 187,44 kg/cm² y 227,26 kg/cm², con una resistencia promedio de 214,975 kg/cm². En cuanto al porcentaje de cumplimiento respecto al diseño especificado ($f'_c = 210$ kg/cm²), se observó que ocho de las diez muestras superaron el 100% de la resistencia nominal, alcanzando valores entre 101,84% y 108,22%. Solo dos muestras (1 y 6) registraron valores ligeramente inferiores al esperado, con 91,74% y 89,26% respectivamente. Estos resultados evidencian que el cemento Holcim cumple satisfactoriamente con los requisitos estructurales establecidos, logrando en promedio superar la resistencia de diseño, lo cual garantiza un margen de seguridad adecuado para su aplicación en elementos de concreto armado.

Tabla 5. Resultados de la confianza del cemento Holcim.

Muestra	Edad (días)	Cilindro 1 (kN)	Cilindro 2 (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Cumplimiento (%)
1	28	147,42	149,36	192,66	91,74
2	28	161,73	167,73	213,87	101,84
3	28	169,27	168,79	219,45	104,50
4	28	173,05	167,96	221,37	105,42
5	28	172,91	177,18	227,26	108,22
6	28	146,63	142,11	187,44	89,26
7	28	170,73	167,37	219,48	104,51
8	28	172,15	171,18	222,88	106,13
9	28	169,28	168,25	219,11	104,34
10	28	173,34	175,16	226,23	107,73
Promedio				214,975	

Con base en los datos presentados en las tablas, se realizó una repetición de pruebas que permitió establecer un f'_c promedio sobre la base de un hormigón de 210 kg/cm². En la Figura 1 se presenta la distribución de los resultados, con el fin de mostrar de manera clara la resistencia obtenida en cada muestra y los niveles altos y bajos alcanzados durante el proceso de verificación.



Fig. 1. Resistencia a la compresión de las muestras, Selvalegre.

La otra marca de cemento analizada fue Selvalegre. Lo que normalmente se denomina sobrediseño corresponde al margen de confianza establecido para asegurar que, en lo posible, ningún valor se ubique por debajo del f'_c especificado, considerando que la mezcla de hormigón está sujeta a múltiples variables y que los hormigones dosificados en obra carecen, en su mayoría, de un control de calidad adecuado.

Dado que la información estadística disponible es limitada, la evaluación basada en 10 ensayos permite verificar que el diseño propuesto cumple con la resistencia requerida, proporcionando un margen de confianza apropiado, siendo representado esto en la Tabla 6.

Tabla 6. Trazabilidad del margen de confianza con cemento Selvalegre.

Muestra	Edad (días)	Cilindro 1 (kN)	Cilindro 2 (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Cumplimiento (%)
1	28	172,51	168,54	221,31	105,38
2	28	165,30	163,28	213,30	101,57
3	28	169,64	168,15	219,28	104,42
4	28	170,43	170,52	221,33	105,40
5	28	150,98	153,86	197,91	94,24
6	28	167,15	169,12	218,29	103,95
7	28	168,39	169,01	219,03	104,30
8	28	171,11	171,18	222,10	105,76
9	28	166,50	164,10	214,61	102,20
10	28	170,25	170,77	221,38	105,42
Promedio				216,854	

El gráfico de resistencia se presenta en la Figura 2 y muestra de forma eficiente lo expuesto en la tabla. Este diseño asegura un margen de sobre-resistencia, garantizando que el valor de f'_c sea igual o superior a 210 kg/cm² a los 28 días, cumpliendo con los parámetros recomendados.



Fig. 2. Resistencia a la compresión de las muestras, Holcim.

A. Discusión

La dosificación por volumen aparente validada en este estudio demuestra que, bajo control técnico y trazabilidad de materiales, es posible alcanzar resistencias estructurales superiores a 210 kg/cm². Esta afirmación contrasta con el enfoque racional propuesto por el Instituto del Cemento Portland Argentino [15], que sostiene que las mezclas deben diseñarse exclusivamente mediante métodos normativos que consideren economía, trabajabilidad y durabilidad, descartando el uso de proporciones empíricas en obra. Sin embargo, este estudio evidencia que, al establecer equivalencias volumétricas precisas y realizar ensayos de laboratorio, la dosificación por volumen puede ser una alternativa viable en contextos donde el acceso al diseño normativo es limitado.

Uno de los aportes más relevantes de la investigación es la trazabilidad del cemento y la verificación estadística de la resistencia mediante 10 ensayos. Esto contrasta con el estudio de Sarmiento et al. [16], quienes evidencian que en muchas obras latinoamericanas se omite el control de calidad, lo que genera fallas estructurales por mezclas mal dosificadas. La propuesta presentada, aunque empírica en origen, se fortalece con datos técnicos que permiten replicabilidad y confiabilidad, incluso en contextos sin un laboratorio permanente.

La mezcla propuesta mantiene un asentamiento entre 4 y 6 pulgadas, lo que garantiza una adecuada trabajabilidad sin comprometer la resistencia. El cálculo de equivalencia volumétrica para un saco de cemento de 50 kg se basa en la densidad aparente determinada en laboratorio, lo que permite establecer una dosificación reproducible en obra. Esta solución responde a la crítica planteada en [17], que advierte que la falta de información técnica sobre densidades reales y aparentes en fichas comerciales impide una dosificación precisa, especialmente cuando se trabaja por volumen. La investigación no solo valida la mezcla tradicional, sino que aporta una herramienta técnica que permite superar esta limitación, facilitando un diseño empírico con respaldo experimental.

CONCLUSIONES

La dosificación propuesta, consistente en un saco de cemento (50 kg), dos partes de arena y 2,5 partes de piedra, fue verificada mediante ensayos de laboratorio que demuestran su capacidad para alcanzar una resistencia estructural igual o superior a 210 kg/cm². Esta proporción, utilizada con frecuencia en obras de construcción, fue sometida a un control técnico que permitió establecer su equivalencia volumétrica en función de parámetros como la densidad aparente del cemento y la masa unitaria de los agregados. Los resultados obtenidos permiten afirmar que esta dosificación es reproducible y confiable, siempre que se mantenga la calidad de los materiales y se controle adecuadamente el contenido de agua, convirtiéndose en una alternativa válida para proyectos que requieren eficiencia sin comprometer el desempeño estructural.

El análisis de las marcas de cemento Holcim Fuerte y Selvalegre permitió comprobar que, bajo condiciones controladas y con una dosificación definida, ambas alcanzan la resistencia especificada de 210 kg/cm² a los 28 días. Esta verificación técnica confirma que el cemento tipo GU, cuando se utiliza con agregados correctamente caracterizados y en proporciones adecuadas, responde favorablemente a los requerimientos estructurales. La trazabilidad implementada en el estudio demuestra que es posible garantizar el cumplimiento del f'_c en obra, incluso en contextos donde el control de calidad es limitado, siempre que se apliquen criterios técnicos mínimos y se utilicen cementos certificados.

El diseño validado en laboratorio permite reducir la variabilidad en obra, facilitando la preparación de mezclas que cumplen con los requisitos estructurales. Además, al vincular las dimensiones y propiedades físicas de los materiales, se proporciona una herramienta práctica que mejora la calidad del hormigón y optimiza el proceso constructivo sin necesidad de equipos especializados.

De esta forma, se concluye que la dosificación propuesta puede implementarse en obras de pequeña y mediana escala, siempre que se realice una caracterización previa de los materiales y se establezca un protocolo básico de control del contenido de agua y del proceso de mezcla, lo que permitirá mantener la consistencia estructural sin requerir equipos avanzados.

REFERENCIAS

- [1] J. Santamaría, L. Morales, and J. Pilaluisa, "Modelo para dosificación de mezclas de hormigón utilizando lógica difusa," *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, vol. 5, no. 1, pp. 54–65, 2018.
- [2] W. Almeida, "Análisis comparativos de métodos de diseño de mezclas de un hormigón de alta resistencia conformado por agregados procedentes de la cantera de pintag," Master's thesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [3] C. Videla, "Dosificaciones de hormigón," Master's thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador, 2020.
- [4] B. C. V. Parráles, "Composición de mezclas de agregados agruesos y finos en la resistencia a la compresión y porosidad del hormigón," *Dialnet*, vol. 8, no. 1, pp. 600–613, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9252197>

- [5] J. Santamaría, "Influencia de la calidad de los agregados y tipo de cemento en la resistencia a la compresión del hormigón dosificado al volumen," *Novasinerгия*, vol. 4, no. 1, 2021, doi: 10.37135/ns.01.07.05.
- [6] N. H. J. Manso, "Caracterización e idoneidad de la utilización de triturado de palas de aerogenerador en la producción de hormigón," Repositorio Institucional Universidad de Burgos, 2023. [Online]. Available: <https://riubu.ubu.es/handle/10259/10198>
- [7] B. A. Aguiar R., "Rigideces efectivas de vigas de concreto reforzado para diseño sísmico: mitos y realidades," *Revista de Ingeniería en Estructuras*, vol. 24, 2019, accedido: ene. 2025. [Online]. Available: <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/riie/article/view/1165>
- [8] H. Ecuador, "Recomendaciones para la dosificación de hormigón," 2023.
- [9] A. C. A. Ríos, "Diseño de mezclas de hormigón en escoria de fundición," *Horizonte Académico*, vol. 4, no. 2, pp. 67–89, 2024, doi: 10.70208/3007.8245.v4.n2.33.
- [10] J. A. C. Bustamante, "Estudio comparativo de mezclas de hormigón tradicional y hormigón con ripio," *Dialnet*, vol. 6, no. 7, pp. 1254–1268, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9556442>
- [11] R. Z. B. Baque, "Diseño de mezclas de hormigón recicladas aplicando el método del volumen de mortero equivalente," Repositorio UNESUM, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/7104>
- [12] A. M. A. Pesántes, "Uso de plásticos reciclados en reemplazo de agregados finos para la fabricación de hormigón estructural y su aplicación en el cantón azogues," Repositorio Digital Universidad Católica de Cuenca, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.ucacue.edu.ec/items/e3714f1d-1521-4adf-8341-eb91479ee0d0>
- [13] J. E. Narváez and V. M. Orellana, "Análisis de la resistencia a la compresión de $f'c = 240$ kg/cm² entre un hormigón convencional y un hormigón con mezcla de vidrio molido," Universidad Técnica Salesiana, 2024.
- [14] ACI Committee 211, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy-weight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*. American Concrete Institute, 2002.
- [15] ICPA, "Diseño racional de mezclas de hormigón – método icpa," Instituto del Cemento Portland Argentino, 2022.
- [16] A. Sarmiento, C. C. Sierra, C. Uribe, and C. Logreira, "Resistencia a la compresión del concreto," Universidad Tecnológica de Bolívar, 2018.
- [17] Polpaico. (2023) Manual del constructor – diseño de mezcla. Acceso: 22-02-2025. [Online]. Available: <https://manualdelconstructor.polpaico.cl/3-el-hormigon/3-4-diseno-de-mezcla/>

AUTORES



Mario Ecuador Macías Loor es ingeniero civil, graduado de la Universidad Técnica de Manabí. Se desempeña como Gerente de Calidad en la empresa Megarok y es especialista en control de calidad de hormigones y agregados.



Jhon Jairo Molina Moreira es ingeniero civil con una maestría en Ingeniería Civil y Construcciones Civiles. Se desempeña como docente universitario y coordinador académico, además de ejercer como técnico y diseñador estructural en obras públicas y privadas. Posee dominio de diversas herramientas especializadas vinculadas al ámbito de la construcción.

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i22.117>

Automatización y robótica en la gestión de operaciones: retos administrativos, sociales y de innovación emprendedora

Ludwin David Huacasi Añamuro*
<https://orcid.org/0000-0003-0690-6412>
lhuacasi@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Rildo Santos Bellido Medina
<https://orcid.org/0000-0002-8699-3490>
rbellidome@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Erick Percy Berrios Fernández
<https://orcid.org/0009-0009-8311-7282>
eberrios@ucsm.edu.pe
Universidad Católica de Santa María
Arequipa, Perú

Christian Herbert Cueva Allison
<https://orcid.org/0009-0008-4339-4798>
ccuevaa@ucsm.edu.pe
Universidad Católica de Santa María
Arequipa, Perú

*Autor de correspondencia: lhuacasi@unsa.edu.pe

Recibido (03/08/2025), Aceptado (10/10/2025)

Resumen. En este estudio experimental se analiza la implementación de un sistema automatizado con brazo robótico en un entorno de manufactura semiestructurada, evaluando sus impactos en la eficiencia operativa, la reorganización administrativa, la percepción social de los trabajadores y las oportunidades de innovación emprendedora. Se diseñó un prototipo funcional de célula de trabajo automatizada integrada con sensores, un microcontrolador y una interfaz de control digital. Se aplicó un análisis comparativo de desempeño antes y después de la intervención, junto con encuestas semiestructuradas a los operarios y entrevistas a gerentes de área. Los resultados revelan mejoras del 34,5% en tiempos de ciclo, pero también evidencian tensiones en la gestión del talento humano y desafíos éticos. Se concluye que la automatización no solo es una herramienta técnica, sino una palanca para repensar modelos administrativos y fomentar microemprendimientos de base tecnológica.

Palabras clave: automatización industrial, brazo robótico, gestión operativa, impacto social, innovación emprendedora.

Automation and Robotics in Operations Management: Administrative, Social, and Entrepreneurial Innovation Challenges

Abstract. This experimental study examines the implementation of an automated system with a robotic arm in a semi-structured manufacturing environment, assessing its impacts on operational efficiency, administrative reorganization, workers' social perceptions, and opportunities for entrepreneurial innovation. A functional prototype of an automated work cell was designed, integrating sensors, a microcontroller, and a digital control interface. A comparative performance analysis was conducted before and after the intervention, along with semi-structured surveys administered to operators and interviews with area managers. The results reveal a 34.5% improvement in cycle times, while also highlighting tensions in human talent management and emerging ethical challenges. The study concludes that automation is not merely a technical tool, but a lever for rethinking administrative models and fostering technology-based micro-entrepreneurship.

Keywords: industrial automation, robotic arm, operational management, social impact, entrepreneurial innovation.



I. INTRODUCCIÓN

La automatización y la robótica se han consolidado en las últimas décadas como ejes medulares de la modernización industrial, impulsadas por la convergencia tecnológica de sensores, control digital, inteligencia artificial y sistemas ciberfísicos. En este contexto de transformación, frecuentemente denominado como Industria 4.0, la incorporación de robots industriales ha permitido a las empresas optimizar procesos, mejorar la calidad de sus productos y aumentar la productividad laboral [1].

Un metaanálisis reciente, basado en más de 1800 estimaciones provenientes de 81 estudios primarios, concluye que, aunque existe una tendencia general hacia mejoras de productividad con la robotización, el efecto promedio, considerando todos los contextos y niveles de adopción, es modesto y se ve atenuado por los costos de ajuste y las intensidades bajas de adopción robótica [2].

Por otro lado, estudios contemporáneos que emplean datos de empresas manufactureras muestran que la adopción de robots industriales puede estimular la productividad total de los factores (TFP), especialmente cuando la integración se acompaña de capital humano calificado, mejoras en métodos operativos y reconfiguración administrativa [3]. Estos hallazgos sugieren que la robotización no es un fin en sí mismo: su beneficio real depende de cómo se inserte en un sistema organizativo mayor, con infraestructura de gestión, formación técnica y visión estratégica.

Sin embargo, la automatización también genera desafíos importantes. Desde la perspectiva del empleo, existe evidencia de que la introducción de robots tiende a producir un efecto de desplazamiento sobre tareas rutinarias o repetitivas, especialmente en niveles de baja o mediana calificación, mientras que simultáneamente puede aumentar la demanda por trabajadores altamente calificados, encargados de programación, mantenimiento o supervisión técnica [4]. Esto plantea tensiones estructurales en las organizaciones y en los mercados laborales, particularmente en economías emergentes o en empresas medianas donde los recursos para reconversión son limitados.

Además, la integración de sistemas robóticos exige replantear los procesos administrativos, las dinámicas de supervisión, la formación del personal y la gestión del cambio cultural. En este sentido, no basta con instalar tecnología: se requiere un diseño organizacional consciente que articule la reconfiguración operativa con estrategias para el desarrollo del talento humano, la redistribución de funciones y, en algunos casos, la creación de nuevas oportunidades de negocio [5].

De esta manera, el presente trabajo mezcla promesas de eficiencia y retos de gestión desde una perspectiva social. A diferencia de trabajos de carácter teórico o de revisión, esta investigación aborda la implementación de un sistema automatizado mediante robótica en una empresa mediana de manufactura semiestructurada, evaluando no solo los indicadores operativos, sino también los efectos en la organización administrativa, en la percepción laboral y en las posibilidades de innovación emprendedora. Con ello, se pretende aportar evidencia empírica sobre la multifacética naturaleza de la automatización como herramienta técnica, como catalizadora de transformación organizativa y como posible motor de emprendimientos de base tecnológica.

II. MARCO TEÓRICO

La automatización industrial representa una de las transformaciones más significativas en la gestión de operaciones del siglo XXI. Su implementación se ha visto fortalecida por el avance de tecnologías como los sistemas ciberfísicos, el Internet Industrial de las Cosas (*IIoT*), el análisis en tiempo real y la robótica colaborativa, elementos centrales de la denominada Industria 4.0. Este paradigma promueve la conexión inteligente entre máquinas, procesos y personas, con el objetivo de optimizar la eficiencia, reducir errores operativos y aumentar la adaptabilidad productiva [6]. La robótica, en particular, desempeña un papel protagonista al permitir automatizar tareas repetitivas, peligrosas o de alta precisión, y ofrecer nuevas posibilidades en el diseño de líneas de producción flexibles y modulares [7].

Numerosos estudios han evidenciado que la incorporación de robots industriales puede mejorar significativamente indicadores de productividad, calidad y disponibilidad operativa. Un análisis reciente de más de 300 empresas manufactureras identificó incrementos promedio del 15 % en la productividad total de los factores, especialmente cuando la automatización se acompaña de rediseños administrativos y mejoras en la capacitación del personal [8]. Sin embargo, estos beneficios no se distribuyen de manera uniforme, pues su impacto depende en gran medida de la capacidad organizativa para integrar tecnología con procesos existentes, adaptar los flujos de trabajo y asegurar la interoperabilidad entre sistemas [9].

Desde una perspectiva organizacional, la automatización no implica simplemente la sustitución de fuerza laboral por maquinaria, sino una reestructuración profunda de funciones como la supervisión, el control de calidad, el mantenimiento predictivo y la toma de decisiones. Esta transformación exige nuevas competencias gerenciales y la adopción de modelos híbridos donde el capital humano interactúa estrechamente con los sistemas digitales (Figura 2). El diseño de interfaces intuitivas, la ergonomía digital y la trazabilidad de datos se convierten en componentes críticos para una implementación exitosa [10]. Asimismo, el despliegue de tecnologías automatizadas presenta desafíos asociados a la adaptación cultural, la resistencia al cambio y la reconfiguración del liderazgo en los equipos de trabajo [11].

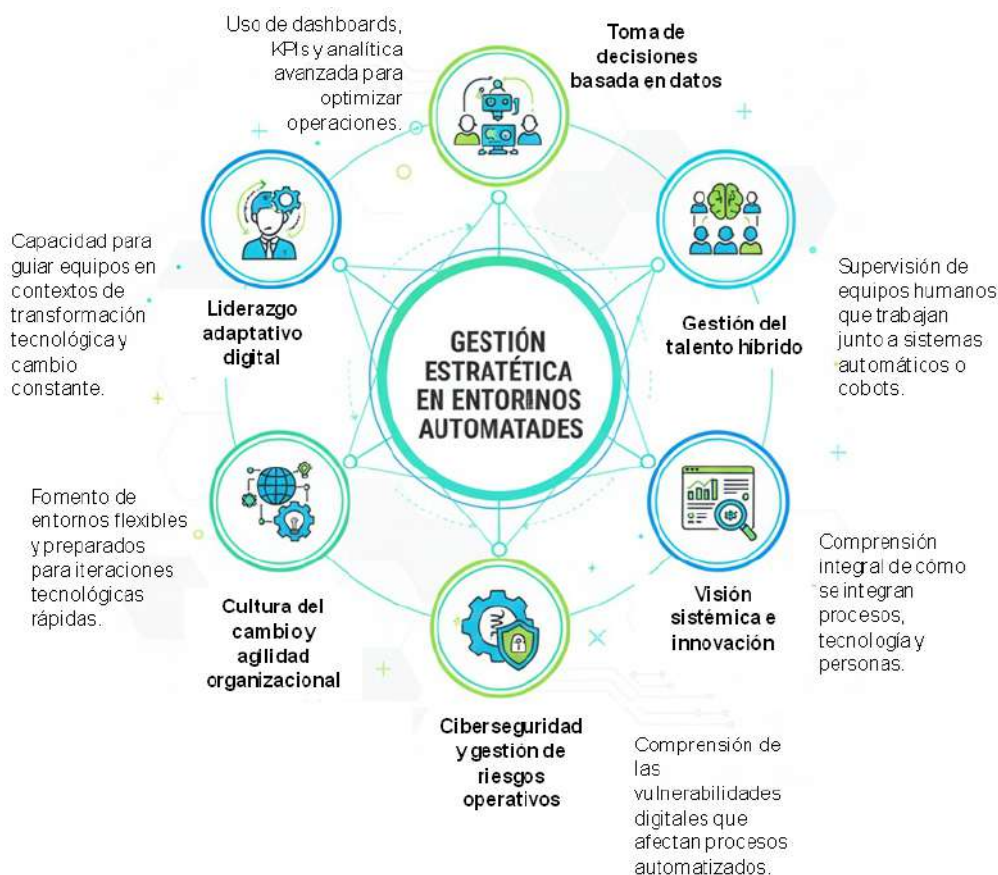


Fig. 1. Nuevas competencias gerenciales en la era de la automatización y la robótica.

El impacto de la automatización sobre el empleo es uno de los temas más debatidos en la literatura reciente. Según el modelo de tareas propuesto por Acemoglu y Restrepo [12], las tecnologías emergentes tienden a reemplazar tareas rutinarias, generando una polarización del mercado laboral: mientras desaparecen empleos de baja calificación, aumentan los requerimientos de perfiles técnicos y profesionales. En el caso de los entornos industriales, esta tendencia se traduce en la necesidad de reconversión laboral, implementación de programas de formación continua y fortalecimiento de habilidades transversales, como la resolución de problemas técnicos, la interpretación de datos y la gestión de tecnologías digitales [13]. Sin estas medidas, la automatización puede acentuar desigualdades, generar incertidumbre y limitar su aceptación social dentro de las organizaciones.

Además de su dimensión tecnológica y laboral, la automatización plantea implicaciones relevantes para la innovación emprendedora. En contextos donde se implementan sistemas robóticos, surgen oportunidades para la creación de microempresas especializadas en mantenimiento, integración de sensores, desarrollo de soluciones de software y consultoría en transformación digital. Diversos estudios han documentado cómo las intervenciones tecnológicas en empresas medianas derivan en la incubación de nuevos proyectos liderados por operarios capacitados, quienes identifican nichos de mercado a partir de sus experiencias directas con sistemas automatizados [14]. Esta dimensión innovadora puede potenciarse si las organizaciones desarrollan entornos de aprendizaje, promueven la autonomía técnica de sus equipos y establecen alianzas estratégicas con centros de investigación o instituciones de educación superior.

III. METODOLOGÍA

Este estudio adopta un enfoque cuantitativo–cualitativo de tipo experimental aplicado, orientado a evaluar los efectos de la implementación de un sistema robótico automatizado en una unidad operativa de manufactura semiestructurada. La investigación se desarrolló en una empresa mediana del sector productivo industrial, con el propósito de analizar de manera integral los impactos técnicos, administrativos y sociales derivados de la automatización parcial de una célula de trabajo.

Se empleó un diseño cuasi-experimental con medición *pretest* y *postest* sin grupo de control paralelo, dado que la intervención se realizó sobre una unidad operativa en condiciones reales de funcionamiento. El objeto de estudio fue una estación de trabajo originalmente manual, donde se llevaban a cabo tareas de ensamblaje repetitivo (Figura 2). Esta estación fue posteriormente automatizada mediante la implementación de un brazo robótico programable, sensores ópticos y un sistema de control digital con interfaz visual.

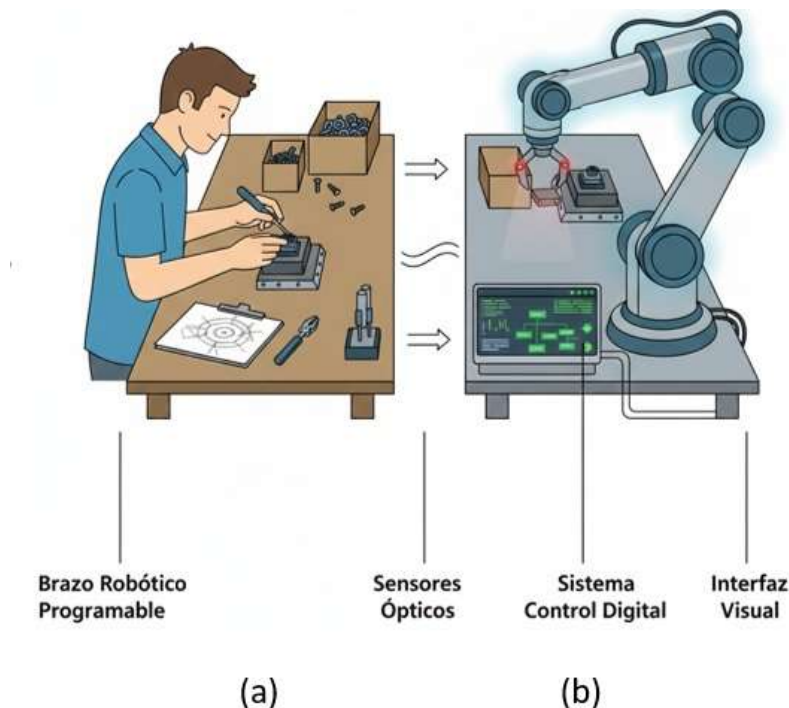


Fig. 2. Ejemplo visual de estación de trabajo empleada, (a) modo manual (b) modo automatizado.

La comparación entre las fases preintervención y postintervención permitió cuantificar los cambios en variables operativas clave, así como evaluar las percepciones del personal involucrado y la generación de ideas emprendedoras derivadas del proceso. De esta manera, la unidad de análisis fue una estación de ensamblaje en una línea de producción con un promedio de 8 operarios rotativos. Se seleccionaron 6 trabajadores y 2 supervisores para la fase cualitativa, mientras que la recolección cuantitativa de datos operativos consideró los registros técnicos de 30 ciclos de producción antes y después de la automatización. Esta muestra fue seleccionada por conveniencia, con criterios de acceso, disponibilidad y continuidad operativa.

Para esto, se utilizaron diversos instrumentos de medición:

- *Ficha técnica de desempeño operativo*: diseñada para registrar el tiempo de ciclo, número de errores, frecuencia de paradas y volumen producido.
- *Guía de entrevista semiestructurada*: aplicada a los supervisores y operarios para identificar percepciones, resistencias y adaptaciones ante el nuevo sistema.
- *Registro de propuestas de mejora*: formulario abierto donde los trabajadores expresaron ideas para optimizar el sistema o derivar proyectos innovadores.
- *Checklists administrativos*: elaborados para evaluar cambios en los procesos de supervisión, control de calidad y requerimientos de gestión post-automatización.

Las variables se agruparon en tres dimensiones principales según se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones y variables utilizadas en el estudio.

Dimensión	Variable principal	Indicadores específicos
Operativa	Eficiencia productiva.	Tiempo de ciclo, errores por lote, volumen de salida.
Administrativa	Transformación organizacional.	Carga de supervisión, registros de mantenimiento, roles redefinidos.
Social-emprendedora	Adaptación y respuesta del personal.	Nivel de aceptación, número de propuestas innovadoras.

El estudio se desarrolló en cuatro fases:

1. *Fase 1: Diagnóstico inicial*, donde se realizó la observación directa, levantamiento de tiempos y entrevistas para establecer la línea base.
2. *Fase 2: Diseño e instalación del sistema robótico*, donde se programó un brazo robótico de 4 grados de libertad controlado por Arduino Mega, con sensores y un sistema de interfaz gráfica desarrollado en Python.
3. *Fase 3: Capacitación y adaptación del personal*, que consistió en sesiones breves de formación técnica y un periodo de 5 días de convivencia operativa antes de la recolección posttest.
4. *Fase 4: Evaluación final y análisis comparativo*, donde se aplicaron los instrumentos y se consolidaron los datos para identificar los cambios y evaluar el cumplimiento de los objetivos.

Los datos cuantitativos fueron procesados mediante estadística descriptiva y análisis comparativo de medias para observar variaciones significativas en los indicadores antes y después de la intervención. Los datos cualitativos se analizaron mediante codificación temática, categorizando las respuestas en torno a tres ejes: percepción de utilidad, barreras de aceptación y potencial de innovación. Los hallazgos fueron triangulados para validar la coherencia entre las dimensiones operativas, administrativas y sociales.

IV. RESULTADOS

A. Fase 1: Diagnóstico inicial

Durante la primera semana de levantamiento de datos, se realizó un seguimiento no participativo de la estación de ensamblaje manual con registro continuo de actividades, flujos, pausas y errores operativos. La célula productiva estaba conformada por un operario responsable del ensamblaje de componentes plásticos y un supervisor encargado de la verificación final. Se observaron cuellos de botella en la sincronización entre el retiro del componente anterior y la colocación del siguiente, así como interrupciones frecuentes por ajustes menores en el posicionamiento de piezas.

Entre los hallazgos más relevantes, se identificó que la estación dependía en un 100 % de la motricidad fina del operario, no existía estandarización de tiempos de ciclo y se registraron en promedio 2 errores por cada 10 ciclos, principalmente asociados al posicionamiento impreciso. El operario debía realizar desplazamientos breves pero repetitivos (alcance manual izquierdo-derecho) que acumulaban carga física. Además, se ejecutó una cronometría directa de 30 ciclos consecutivos bajo condiciones normales (Tabla 2).

Tabla 2. Tiempos representativos de ciclo en la estación manual (línea base).

Ciclo	Tiempo (s)	Observaciones
1	22,1	Movimiento errático
3	19,9	Ciclo fluido sin interrupciones
5	21,6	Retrabajo leve por mal ajuste
9	20,3	Tiempo estándar
12	23,7	Ciclo más lento, error en alineación
15	18,8	Ciclo más rápido registrado
19	21,1	Leve desincronización manual
23	20,9	Flujo estable
27	22,4	Movimiento repetido
30	20,5	Ejecución sin errores

Con el objetivo de caracterizar cuantitativamente el desempeño inicial de la estación, se calcularon estadísticos descriptivos generales (Tabla 3).

Tabla 3. Estadísticos descriptivos generales de los ciclos manuales.

Indicador	Valor
Tiempo promedio por ciclo	21,4 segundos
Desviación estándar	1,26 segundos
Tiempo mínimo registrado	18,8 segundos
Tiempo máximo registrado	23,7 segundos
Microparadas observadas	12 en 30 ciclos

Los resultados evidenciaron una alta variabilidad entre ciclos consecutivos, lo que sugiere la ausencia de estandarización y de guías de apoyo visual. Además, se registraron 12 eventos de microparadas por errores de alineación o retrabajos menores.

Durante las entrevistas, los operarios describieron el proceso como “sencillo pero cansado”, indicando fatiga por repetitividad. El supervisor mostró una postura favorable a la automatización, señalando que podría “estabilizar los tiempos y reducir errores”, mientras que uno de los operarios expresó preocupación por una posible pérdida de funciones. Ambos coincidieron en que “una máquina de apoyo sería conveniente si no reemplaza totalmente el rol humano”.

El personal recomendó incorporar sensores de precisión, un botón de parada de emergencia visible y asegurar que los nuevos tiempos de ciclo no excedieran los actuales.

B. Fase 2: Diseño e instalación del sistema robótico

Durante esta fase se diseñó e implementó una célula automatizada de ensamblaje, orientada a replicar las funciones básicas del operario humano con mayor precisión, estabilidad y repetibilidad. El sistema fue desarrollado con un brazo robótico de cuatro grados de libertad, montado sobre una base fija y controlado mediante un microcontrolador Arduino Mega programado en lenguaje C++. El conjunto fue complementado con sensores ópticos de proximidad y presencia, que permiten detectar con precisión la posición del componente a ensamblar, y un sistema de interfaz gráfica diseñado en Python (Tkinter), que facilita la visualización del estado de operación en tiempo real y la activación de funciones específicas del sistema.

El circuito de control incorporó una arquitectura modular (Figura 3), en la cual los sensores envían señales al microcontrolador, que regula el movimiento del brazo mediante servomotores. Se integró una rutina de parada automática ante la detección de obstáculos y un botón físico de emergencia, de acuerdo con las sugerencias del personal operativo obtenidas en la Fase 1. El sistema fue probado en vacío durante quince ciclos de evaluación antes de su entrada en producción con carga real, registrando un desempeño estable y sin errores de ejecución.

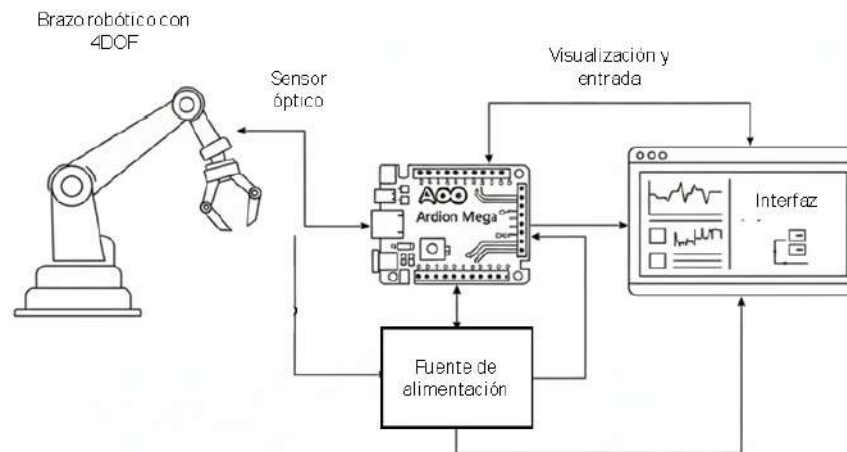


Fig. 3. Esquema de la implementación.

C. Fase 3: Capacitación y adaptación del personal

Tras la instalación del sistema robótico, se desarrolló un proceso breve pero intensivo de capacitación dirigido al equipo operativo, con el objetivo de facilitar la comprensión y el uso seguro del nuevo entorno automatizado. La capacitación consistió en dos sesiones teórico-prácticas de cuarenta y cinco minutos cada una, centradas en: (1) funcionamiento básico del brazo robótico, (2) interpretación de señales del sensor óptico, (3) operación de la interfaz gráfica y (4) procedimientos de parada de emergencia. Las sesiones fueron dirigidas por el equipo técnico desarrollador, y se realizó una demostración supervisada con intervención directa de los operarios.

Posterior a la capacitación, se implementó un período de convivencia operativa de cinco días, durante el cual los trabajadores interactuaron directamente con el sistema en ciclos de producción reales. Durante esta etapa se observaron inicialmente errores de activación en la interfaz, leves demoras en la respuesta manual ante cambios de estado del sistema y dudas frecuentes respecto a la priorización entre botones físicos y la GUI. No obstante, al tercer día de operación continua, el número de errores de uso disminuyó progresivamente.

En la Tabla 4 se presenta un resumen de las observaciones realizadas durante esta fase, basado en una ficha estructurada completada por el supervisor de línea.

Tabla 4. Observaciones durante la fase de adaptación al sistema automatizado.

Día	Incidenias registradas	Nivel de dominio observado	Observación cualitativa destacada
1	5 errores en el uso de la GUI.	Bajo	"No sabía si debía usar el botón físico o la pantalla".
2	3 errores, 2 reinicios manuales.	Intermedio	"Ya entiendo cómo confirmar que la pinza está alineada".
3	1 error leve.	Intermedio-alto	"El sensor responde más rápido de lo que esperaba".
4	0 errores.	Alto	"Ahora sé exactamente en qué momento intervenir".
5	0 errores.	Alto consolidado	"Podría entrenar a otro compañero en esto".

Al finalizar la fase de adaptación, los operarios manifestaron confianza en el uso del sistema y propusieron mejoras menores relacionadas con la disposición del botón de parada y el orden de los menús en la interfaz. Esta etapa fue clave para garantizar una transición efectiva hacia el nuevo modelo de operación y reducir las resistencias iniciales identificadas en la Fase 1.

D. Fase 4: Evaluación comparativa de desempeño

Finalizado el proceso de capacitación y adaptación, se procedió a medir el desempeño del sistema automatizado en condiciones operativas reales, utilizando los mismos instrumentos y criterios que en la Fase 1. Se registraron 30 ciclos consecutivos de producción, ahora ejecutados por el brazo robótico

programado, con intervención mínima del operario. Los resultados mostraron una mejora significativa en el tiempo de ciclo promedio y en la reducción de errores operativos.

Tabla 5. Comparación de indicadores antes y después de la automatización.

Indicador	Estación manual	Estación automatizada	Diferencia (%)
Tiempo promedio por ciclo (s)	21,4	14,0	−34,6 %
Desviación estándar (s)	1,26	0,48	−61,9 %
Ciclos con errores (% del total)	40 % (12 de 30)	3,3 % (1 de 30)	−91,7 %
Microparadas	12	1	−91,6 %

Estos resultados indican que la automatización no solo mejoró la eficiencia temporal, sino que redujo notablemente la variabilidad entre ciclos y los errores de ejecución. La desviación estándar cayó más del 60 %, lo que sugiere una estandarización efectiva del proceso. La reducción de microparadas y fallos de alineación refleja el acierto en el diseño del sistema robótico y en el uso de sensores ópticos de precisión.

En la Figura 4 se presenta una comparación gráfica entre los tiempos promedio de operación y sus respectivas desviaciones estándar para dos tipos de estaciones: manual y automatizada. Se observa que la estación automatizada reduce significativamente el tiempo promedio de ejecución (14,0 s) en comparación con la estación manual (21,4 s), lo que representa una mejora del 34,6 % en eficiencia operativa. Además, la menor dispersión de los datos en la estación automatizada (desviación estándar de 0,48) frente a la estación manual (1,26) indica un proceso más estable y consistente. Estos resultados evidencian el impacto positivo de la automatización sobre la productividad y la precisión del proceso analizado.

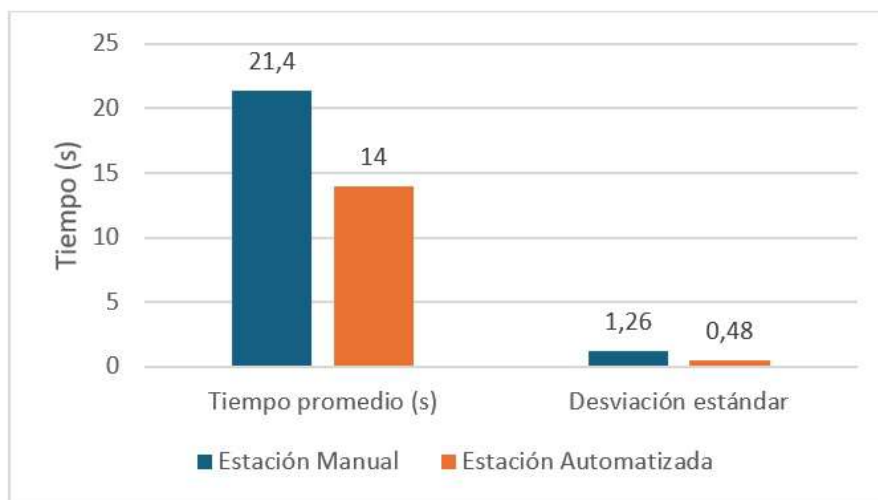


Fig. 4. Comparativa entre manual y automatizado.

E. Retos administrativos, sociales y de innovación emprendedora

La implementación de sistemas automatizados y robóticos en la gestión de operaciones no puede analizarse únicamente desde el plano técnico, pues su impacto real se extiende a dimensiones administrativas, sociales y de innovación. Este estudio experimental, al igual que otros trabajos recientes sobre automatización industrial [1], confirma que los beneficios operativos —como la reducción del tiempo de ciclo y la disminución de errores— son evidentes y medibles. Sin embargo, detrás de estos avances emergen desafíos estructurales que deben abordarse desde una perspectiva integral.

Desde el ámbito administrativo, la automatización implica una reconfiguración profunda del modelo de gestión. La incorporación de sistemas ciberfísicos exige rediseñar flujos de trabajo, jerarquías internas y mecanismos de supervisión. Como señalan Peneder *et al.* [3], el incremento de productividad derivado

de la robótica depende de la capacidad organizativa para absorber y adaptar las nuevas tecnologías. A su vez, Hernández-Peña y Mejía-Trejo [5] destacan que la gestión del cambio debe ser activa, con liderazgo transformacional y un fortalecimiento sistemático de las competencias digitales del personal directivo. Estos cambios administrativos no solo modifican la lógica de producción, sino también las formas de toma de decisiones, que ahora deben fundamentarse en datos en tiempo real y considerar la interacción humano-máquina como un eje central.

En la dimensión social, la automatización genera tensiones vinculadas al empleo, la percepción de reemplazo y la necesidad de reconversión profesional. Si bien estudios como los de Graetz y Michaels [4] o Acemoglu y Restrepo [12] evidencian que la robotización tiende a desplazar tareas rutinarias, también abre nuevas oportunidades para trabajadores con mayor calificación. Este doble efecto, también observado en nuestro estudio, requiere políticas organizacionales orientadas a la formación continua, la participación del personal en los procesos de cambio y la consolidación de una cultura de adaptación. Tal como plantea Autor [13], el objetivo no consiste en evitar la automatización, sino en gestionar sus efectos mediante estrategias inteligentes y socialmente responsables.

Respecto a los retos de innovación emprendedora, este estudio identificó propuestas viables generadas por los propios trabajadores una vez alcanzado un dominio adecuado del sistema robotizado. Esta relación entre automatización e impulso emprendedor también ha sido documentada por Marasco *et al.* [14], quienes resaltan que la Industria 4.0 crea condiciones favorables para el surgimiento de nuevos modelos de negocio, como servicios de mantenimiento predictivo, desarrollo de interfaces inteligentes o impresión 3D de repuestos. No obstante, como advierten Kreutzer *et al.* [11], el liderazgo emprendedor en entornos automatizados no depende solamente de habilidades técnicas, sino también de visión estratégica, colaboración intersectorial y capacidad para gestionar la incertidumbre.

Si bien los beneficios operativos de la automatización han sido ampliamente validados en la literatura [2],[8], su impacto pleno solo se materializa cuando se abordan de manera simultánea los retos administrativos (gestión del cambio y rediseño organizacional), sociales (inclusión, formación y percepción laboral) y emprendedores (creación de valor a partir del nuevo entorno tecnológico). Como subraya la guía estratégica para la Industria 4.0 de Geissbauer *et al.* [9], el verdadero valor de la automatización radica en su integración coherente con las personas, los procesos y los propósitos de transformación sostenible.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio experimental evidencian que la implementación de un sistema robótico en una estación semiestructurada de ensamblaje genera mejoras operativas sustantivas. Se logró reducir el tiempo promedio de ciclo en un 34,6% y disminuir la variabilidad y los errores en más de un 90%, lo que demuestra que la automatización bien diseñada no solo incrementa la eficiencia, sino que estandariza procesos críticos y reduce la dependencia del desempeño humano individual.

Sin embargo, los beneficios técnicos no se materializan de forma aislada. El proceso de instalación, capacitación y adaptación reveló que la automatización introduce retos administrativos significativos, al exigir nuevas formas de gestión, control y supervisión de los sistemas de producción. Las organizaciones deben desarrollar capacidades para rediseñar procesos, liderar el cambio cultural y operar con estructuras más flexibles y orientadas al dato. La tecnología, por sí sola, no transforma; es la forma en que se articula con la estructura administrativa la que determina su impacto real.

En el plano social, el estudio mostró que la percepción del personal evoluciona positivamente cuando se les incluye desde etapas tempranas del proceso. Aunque surgieron temores iniciales sobre la pérdida de funciones, la experiencia directa con el sistema robótico generó confianza, aceptación y motivación. Este hallazgo confirma la importancia de la formación técnica, el acompañamiento y la comunicación clara como estrategias de inclusión tecnológica, especialmente en entornos donde el capital humano es clave para la sostenibilidad operativa.

Uno de los aportes más valiosos del estudio fue la identificación espontánea de ideas innovadoras por parte del equipo operativo, lo que demuestra que la automatización no reemplaza la creatividad humana, sino que puede catalizarla. El surgimiento de propuestas emprendedoras relacionadas con mantenimiento, desarrollo de interfaces o formación técnica evidencia que, cuando se brinda el entorno adecuado, los trabajadores pueden convertirse en agentes activos de innovación tecnológica.

La automatización y la robótica representan una oportunidad integral de transformación si se las

entiende no solo como tecnologías de eficiencia, sino como motores de cambio organizacional, inclusión social y dinamismo emprendedor. Su implementación debe ser estratégica, participativa y orientada al desarrollo de capacidades colectivas, para que la transformación digital sea también una transformación humana y sostenible.

REFERENCIAS

- [1] G. Szabó-Szentgróti, B. Végyvári, and J. Varga, "Impacto de la industria 4.0 y la digitalización en el mercado laboral para 2030: verificación de la predicción de keynes," *Sostenibilidad*, vol. 13, p. 7703, 2021, doi: 10.3390/su13147703.
- [2] P. A. Hancock, D. R. Billings, K. E. Schaefer, J. Y. Chen, E. J. De Visser, and R. Parasuraman, "A meta-analysis of factors affecting trust in human-robot interaction," *Human Factors*, vol. 53, no. 5, pp. 517–527, 2011.
- [3] A. Eder, W. Koller, and B. Mahlberg, "The contribution of industrial robots to labor productivity growth and economic convergence: A production frontier approach," *Journal of Productivity Analysis*, vol. 61, no. 2, pp. 157–181, 2024.
- [4] G. Graetz and G. Michaels, "Robots at work," *Review of Economics and Statistics*, vol. 100, no. 5, pp. 753–768, 2018, doi: 10.1162/rest_a_00754.
- [5] E. M. Garro, "La influencia de la tecnología en el liderazgo global: amplificando habilidades y capacidades en un entorno empresarial digitalizado," *e-Ciencias de la Información*, vol. 14, no. 2, p. 7, 2024.
- [6] Telefónica, "Automatización industrial: qué es y cómo mejora los procesos productivos," 2023, blog de Telefónica. Disponible en: <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/automatizacion-industrial-que-es/>.
- [7] B. Schefold, "The rarity of reswitching explained," *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 67, pp. 128–150, 2023, doi: 10.1016/j.strueco.2023.07.004.
- [8] S. Gong and C. Ding, "Can industrial robots improve labor productivity? evidence from chinese manufacturing firms," *Economic Modelling*, vol. 131, p. 106488, 2024, doi: 10.1016/j.econmod.2024.106488.
- [9] M. Geissbauer, V. Schrauf, A. Koch, and S. Kuge, "A strategist's guide to industry 4.0," *Strategy+Business*, no. 83, pp. 1–12, 2016.
- [10] A. Monostori, "Cyber-physical production systems: Roots, expectations and r&d challenges," *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 9–13, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.03.115.
- [11] R. T. Kreutzer, F. Neugebauer, and A. Pattloch, *Digital Business Leadership: Digital Transformation, Business Model Innovation, Agile Organization, Change Management*. Springer, 2017.
- [12] D. Acemoglu and P. Restrepo, "Tasks, automation, and the rise in us wage inequality," *Econometrica*, vol. 87, no. 5, pp. 1393–1433, 2019, doi: 10.3982/ECTA17434.
- [13] J. Autor, "Why are there still so many jobs? the history and future of workplace automation," *Journal of Economic Perspectives*, vol. 29, no. 3, pp. 3–30, 2015.
- [14] E. Marasco, G. Baldegger, and A. E. Huarng, "The rise of entrepreneurial opportunities in the age of industry 4.0," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 184, p. 122011, 2022, doi: 10.1016/j.techfore.2022.122011.

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i22.118>

ISBN: 978-9907-0-0346-8

Evolución histórica de la ingeniería sanitaria y su impacto en la reducción de la mortalidad infantil

Autores

Roberto Cervantes Rivera

Ruth Antonieta Martha Frisancho De Martinez

Abdon Almonte Mamani

Eloy Armando Vera Medina

Luis Felipe Ticona Lecaros



ISBN: 978-9907-0-0346-8



AutanaBooks
Engineering & Services

Evolución histórica de la ingeniería sanitaria y su impacto en la reducción de la mortalidad infantil

Historical Evolution of Sanitary Engineering and Its Impact on Reducing Child Mortality

Autores



Roberto Cervantes Rivera

ORCID: 0000-0001-7823-6548 ✉ rcervantesr@unsa.edu.pe
🏛 Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Ruth Antonieta Martha Frisancho De Martinez

ORCID: 0009-0009-0776-1498 ✉ dfrisanchoe@unsa.edu.pe
🏛 Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Abdon Almonte Mamani

ORCID: 0000-0003-4904-1340 ✉ aalmonte@unsa.edu.pe
🏛 Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Eloy Armando Vera Medina

ORCID: 0009-0005-2263-4981 ✉ everame@unsa.edu.pe
🏛 Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú



Luis Felipe Ticona Lecaros

ORCID: 0009-0001-7148-4706 ✉ lticonale@unsa.edu.pe

🏛 Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú

Evolución histórica de la ingeniería sanitaria y su impacto en la reducción de la mortalidad infantil.

Autores: Cervantes Rivera, R.; Frisancho De Martinez, R. A. M.; Almonte Mamani, A.; Vera Medina, E. A.; Ticona Lecaros, L. F.

Fecha de recepción: 07/06/2025

Fecha de aceptación: 15/10/2025

ISBN: 978-9907-0-0346-8. Primera edición. Quito, Ecuador.

Derechos reservados © Creative Commons CC-BY, 2025.

AutanaBooks. Quito, diciembre de 2025.



AutanaBooks

Jardines de San Antonio, Urb. Shyris, PO: 170311, Quito.

Pág. web: autanabooks.com

E-mail: editorial@autanabooks.com

ISBN: 978-9907-0-0346-8



1

Resumen

La ingeniería sanitaria ha sido fundamental para la salud pública y la reducción de la mortalidad infantil. Desde los acueductos antiguos hasta las plantas de tratamiento modernas, ha asegurado el acceso al agua potable y saneamiento, previniendo enfermedades infecciosas. Durante la Revolución Industrial, el crecimiento urbano acelerado y la falta de higiene provocaron epidemias que impulsaron el desarrollo de sistemas técnicos para el manejo del agua y desechos. Así, la ingeniería sanitaria se consolidó como disciplina esencial para la protección de la salud colectiva, reduciendo significativamente la mortalidad infantil mundial. Actualmente, sus avances son cruciales frente a desafíos como el cambio climático y la desigualdad en servicios básicos. Comprender su evolución histórica permite valorar cómo la infraestructura, tecnología y políticas públicas han mejorado la calidad de vida y fortalecido la prevención sanitaria.

Palabras clave: ingeniería sanitaria, mortalidad infantil, agua potable, infraestructura WASH, intervenciones estructurales.

Abstract

Sanitary engineering has played a pivotal role in public health and in the global reduction of infant mortality. From ancient aqueducts to modern treatment plants, this field has ensured access to safe drinking water and adequate sanitation, preventing infectious diseases throughout history. During the Industrial Revolution, accelerated urban growth and poor hygiene conditions triggered epidemics that motivated the development of technical systems for water management and waste disposal. Thus, sanitary engineering emerged as an essential discipline for protecting collective health, significantly reducing infant mortality worldwide. Today, its advances remain crucial in the face of challenges such as climate change and persistent inequalities in access to basic services. Understanding its historical evolution allows us to recognize how infrastructure, technology, and public policies have contributed to improved quality of life and strengthened preventive health systems.

Keywords: sanitary engineering, infant mortality, drinking water, WASH infrastructure, structural interventions.

I. Introducción

La ingeniería sanitaria ha sido uno de los pilares fundamentales en la historia del desarrollo humano, especialmente en la mejora de la salud pública y en la reducción de la mortalidad infantil. Su evolución refleja el tránsito de sociedades rudimentarias que convivían con desechos y aguas contaminadas, hacia civilizaciones capaces de gestionar de manera técnica y sostenible los recursos hídricos y los residuos, garantizando entornos más saludables.

A lo largo de los siglos, diferentes culturas y civilizaciones aportaron avances significativos que sentaron las bases de la ingeniería sanitaria moderna. Por ejemplo, en la Edad Media se desarrollaron sistemas de acueductos, cisternas y letrinas públicas en algunas ciudades europeas, mientras que en Asia se implementaron canales y reservorios que aseguraban el suministro de agua potable y el manejo de desechos, demostrando un entendimiento creciente de la relación entre infraestructura, higiene y salud poblacional.

Con la Revolución Industrial y el crecimiento urbano acelerado, los desafíos sanitarios se intensificaron, llevando al surgimiento de soluciones más sistemáticas como plantas de tratamiento de aguas, redes de alcantarillado modernas y regulaciones sanitarias estrictas. Estos avances no solo redujeron drásticamente la incidencia de enfermedades infecciosas, sino que también transformaron la expectativa y calidad de vida de millones de personas, consolidando la ingeniería sanitaria como un componente estratégico del desarrollo social y económico global. Esta evolución se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1: *Línea de tiempo de la evolución histórica de la ingeniería sanitaria.*

Período / Año	Hito / Avance en Ingeniería Sanitaria	Impacto principal en salud pública
Antes del siglo XIX	Sistemas de acueductos y pozos en civilizaciones antiguas (Roma, Mesopotamia, Egipto).	Provisión básica de agua potable; prevención limitada de enfermedades infecciosas.
1800–1850	Revolución Industrial; primeros sistemas de alcantarillado en Europa y EE. UU.	Reducción de brotes de cólera y fiebre tifoidea; control de aguas residuales urbanas.
1854	Brote de cólera en Londres y trabajo de John Snow.	Identificación de transmisión por agua contaminada; inicio de la epidemiología moderna.
Finales del siglo XIX	Desarrollo de plantas de tratamiento y filtros de arena.	Mejora en la calidad del agua; reducción de mortalidad infantil por enfermedades diarreicas.
1900–1950	Expansión de redes de agua potable y alcantarillado.	Disminución de enfermedades infecciosas; aumento de la esperanza de vida urbana.
1960–1980	Introducción de normas de saneamiento y control de calidad del agua.	Reducción de brotes epidémicos; fortalecimiento del enfoque preventivo.
1990–2023	Cobertura casi total de agua potable segura y saneamiento mejorado; tecnologías modernas de tratamiento y monitoreo.	Reducción de mortalidad infantil; mejora de salud comunitaria y avance hacia los ODS.

A. Orígenes y civilizaciones antiguas

Los primeros indicios de prácticas sanitarias datan de hace más de 4.000 años. Civilizaciones como la India (Valle del Indo), Egipto, Grecia y Roma desarrollaron sistemas primitivos de drenaje, letrinas y acueductos. En el Valle del Indo, alrededor del 2500 a.C., las ciudades de Mohenjo-Daro y Harappa contaban con redes de desagüe cubiertas y sistemas de alcantarillado doméstico, evidenciando una temprana comprensión de la higiene, mientras que siglos más tarde los romanos perfeccionaron la ingeniería del agua mediante acueductos y cloacas, como la Cloaca Máxima, considerado uno de los sistemas de saneamiento más avanzados de la antigüedad.

B. Impacto global en la mortalidad infantil

El impacto de la ingeniería sanitaria en la salud infantil ha sido contundente. La OMS y UNICEF reportan que entre 1990 y 2020, el acceso al saneamiento mejorado aumentó de 54 % a 74 % a nivel mundial, y la mortalidad infantil por enfermedades diarreicas se redujo en más del 60 %.

Esto se debe a el acceso a agua potable libre de patógenos previene infecciones gastrointestinales, mientras que la eliminación adecuada de excretas reduce la exposición a agentes infecciosos, todo ello complementado con educación sanitaria y promoción de hábitos de higiene, respaldados por una infraestructura segura.

La ingeniería sanitaria, entendida como el conjunto de técnicas, infraestructura y políticas orientadas a garantizar suministro de agua potable, recolección y tratamiento de aguas residuales, y prácticas de higiene, ha sido una de las intervenciones estructurales más decisivas en la transformación de la salud pública moderna. Durante los siglos XIX y XX, la extensión de redes de acueductos, sistemas de alcantarillado, procesos de filtración y cloración y la adopción de tecnologías de tratamiento de aguas convirtieron problemas endémicos (cólera, tifus, fiebre tifoidea y diarreas infecciosas) en riesgos gestionables, provocando reducciones sustanciales en la mortalidad infantil en países que llevaron a cabo esas inversiones a escala urbana y nacional [1], [2]. Estos cambios técnicos no actuaron aisladamente: se combinaron con reformas institucionales, vigilancia epidemiológica y campañas sanitarias que amplificaron su efecto sobre la supervivencia infantil [3].

La evidencia empírica histórica y contemporánea sugiere que las mejoras en agua y saneamiento explican una proporción relevante de la caída de la mortalidad infantil en las transiciones epidemiológicas. Estudios econométricos y análisis de series históricas muestran que la introducción sistemática de agua filtrada y clorada y de sistemas de alcantarillado fueron responsables de reducciones dramáticas en la mortalidad infantil en ciudades y estados de países de ingresos altos durante el cambio de los siglos XIX–XX; investigaciones recientes que explotan variación espacio-temporal y natural (por ejemplo, intervenciones escalonadas en Massachusetts y otras ciudades) estiman que la combinación agua + alcantarillado, explicó una fracción considerable del descenso observado en la mortalidad de menores de cinco años en esos períodos [4], [5]. En el mismo sentido, revisiones sistemáticas modernas y meta-análisis sobre intervenciones WASH (*water, sanitation and hygiene*) en entornos de bajos y medianos ingresos documentan reducciones significativas en la mortalidad infantil por todas las causas y, en particular, por diarrea, cuando se implementan mejoras en el suministro de agua y en saneamiento y cuando estas vienen acompañadas de higiene adecuada [6].

La evolución tecnológica y conceptual de la ingeniería sanitaria muestra una trayectoria larga y acumulativa: desde soluciones ingenieriles en civilizaciones antiguas y sistemas romanos de

conducción y drenaje, pasando por las innovaciones de tratamiento y planificación urbana de la Revolución Industrial, hasta las plantas modernas de tratamiento secundario y terciario y las estrategias descentralizadas contemporáneas para contextos rurales y periurbanos. Esta historia técnica se encuentra entrelazada con factores políticos, económicos y sociales —financiamiento público, regulaciones, movimientos sanitarios y prioridades urbanas— que determinaron cuándo y cómo las tecnologías se adoptaron y beneficiaron a distintas poblaciones [7]. Comprender esta evolución histórica no es sólo un ejercicio descriptivo: permite identificar mecanismos causales (por ejemplo, la eliminación de fuentes puntuales de exposición a patógenos en el agua potable) y lecciones de implementación que son directamente aplicables a los esfuerzos actuales por reducir la mortalidad infantil en países en desarrollo.

En consecuencia, la revisión histórica y analítica de la ingeniería sanitaria aporta tres contribuciones esenciales para la investigación y la política actuales: (I) ofrece evidencia de que las inversiones estructurales en agua y saneamiento han sido y siguen siendo determinantes para la supervivencia infantil; (II) muestra que las intervenciones aisladas (p. ej., solo higiene o solo tratamiento domiciliario del agua) suelen tener un impacto menor que las estrategias integradas que combinan suministro, saneamiento y comportamiento sanitario; y (iii) plantea que las políticas contemporáneas para reducir la mortalidad infantil —especialmente en contextos de bajos recursos— deben revalorar el papel de las infraestructuras sanitarias como complemento necesario de intervenciones biomédicas y educativas, en lugar de relegarlas a soluciones parciales o temporales [4], [5], [6]. Esta introducción sienta las bases para un análisis multidimensional que combine perspectivas históricas, epidemiológicas y de ingeniería, con el fin de extraer conclusiones robustas sobre cómo la praxis y la inversión en ingeniería sanitaria pueden seguir contribuyendo a la protección de la infancia en el siglo XXI.

II. Desarrollo

La ingeniería sanitaria ha sido históricamente un pilar fundamental de la salud pública, al intervenir de manera estructural en los determinantes ambientales de la salud. Su desarrollo ha acompañado la evolución de la humanidad, desde las primeras canalizaciones de agua en civilizaciones antiguas hasta la sofisticación de sistemas modernos de tratamiento y disposición de aguas residuales [8], [9]. En contextos urbanos de la Revolución Industrial, el rápido crecimiento poblacional y la concentración en ciudades generaron crisis sanitarias que evidenciaron la necesidad de infraestructuras robustas de agua y saneamiento, lo que motivó la construcción de acueductos, redes de alcantarillado y la adopción de técnicas de filtración y cloración [10], [11]. Estas intervenciones no solo transformaron el paisaje urbano, sino que tuvieron un impacto directo y medible en la mortalidad infantil, al disminuir drásticamente la incidencia de enfermedades infecciosas transmitidas por agua, como diarrea, cólera y fiebre tifoidea [12], [13], [14], [15].

La evidencia empírica histórica subraya que las mejoras en agua potable y saneamiento fueron determinantes en la caída de la mortalidad infantil. Cutler y Miller demostraron que la filtración y cloración del agua en ciudades estadounidenses de principios del siglo XX explicaron una fracción significativa del descenso en la mortalidad infantil y en la mortalidad total [4]. De manera complementaria, Alsan y Goldin analizaron datos históricos de Massachusetts entre 1880 y 1920, concluyendo que la combinación de agua potable confiable y sistemas de alcantarillado produjo efectos sinérgicos sobre la supervivencia infantil, resaltando la importancia de intervenciones integrales en lugar de medidas aisladas [3]. En un contexto contemporáneo, Bhatia revisó cómo la negligencia de estas intervenciones estructurales en iniciativas de salud global limita la efectividad de programas centrados únicamente en medidas biomédicas o educativas, subrayando la

relevancia de aprender de experiencias históricas para políticas actuales [5].

Los avances en la ingeniería sanitaria no se limitan a la tecnología, sino que incluyen aspectos institucionales, políticos y sociales [16], [17]. La planificación urbana, la regulación pública, el financiamiento estatal y la educación sanitaria han sido factores críticos que determinaron la adopción y sostenibilidad de las infraestructuras [18], [19]. Además, los enfoques modernos de WASH (*water, sanitation and hygiene*) han evidenciado que la combinación de mejoras en infraestructura con prácticas de higiene puede reducir significativamente la morbilidad y mortalidad infantil, especialmente por diarrea, en países de bajos y medianos ingresos [20]. Esto confirma que las estrategias de ingeniería sanitaria deben concebirse de manera integral, considerando no solo la disponibilidad de tecnología sino también su aceptación social, su mantenimiento y la educación de la población.

Históricamente, la ingeniería sanitaria ha representado un ejemplo paradigmático de cómo intervenciones estructurales pueden transformar la salud pública de manera duradera. Desde la eliminación de fuentes puntuales de patógenos hasta la creación de plantas modernas de tratamiento de aguas residuales, su evolución refleja la interacción entre innovación tecnológica, evidencia científica y políticas públicas eficaces. La revisión histórica de estos procesos permite comprender los mecanismos mediante los cuales la ingeniería sanitaria ha reducido la mortalidad infantil y ofrece lecciones valiosas para la planificación de intervenciones contemporáneas en entornos con recursos limitados, enfatizando la necesidad de soluciones integrales y sostenibles [7].

En la actualidad, la ingeniería sanitaria ha evolucionado hacia un enfoque sostenible que integra la tecnología con la protección ambiental y la equidad social. Se promueven soluciones innovadoras como la reutilización de aguas grises, los humedales artificiales, el tratamiento descentralizado y la gestión integral de residuos sólidos. Estas estrategias buscan garantizar el acceso universal al agua limpia, incluso en comunidades rurales o marginales, donde la mortalidad infantil sigue siendo un problema de salud pública. Además, el cambio climático y el deterioro ambiental han posicionado a la ingeniería sanitaria como un eje fundamental para la adaptación y resiliencia de las ciudades, al mismo tiempo que refuerza su papel en la preservación de la salud humana [10].

Por tanto, la ingeniería sanitaria no solo representa una disciplina técnica, sino una expresión del compromiso ético de la humanidad con la vida y el bienestar colectivo. Su desarrollo histórico demuestra que el progreso científico, cuando se orienta hacia la justicia social y la sostenibilidad, tiene la capacidad de transformar radicalmente la calidad de vida de las poblaciones más vulnerables, especialmente la infancia [21].

A. Situación global: Mortalidad infantil y acceso a agua y saneamiento

Mortalidad Infantil Global

En 2023, la tasa de mortalidad infantil global fue de 37 muertes por cada 1.000 nacidos vivos, lo que representa una disminución del 61 % respecto a 1990, cuando era de 94 muertes por cada 1.000 nacidos vivos. A pesar de este notable avance, aún se registraron aproximadamente 13.100 muertes diarias de niños menores de cinco años, muchas de ellas prevenibles [22]. Las disparidades regionales siguen siendo marcadas, ya que África subsahariana continúa siendo la región con la tasa de mortalidad infantil más alta del mundo, con 68 muertes por cada 1.000 nacidos vivos en 2023; en esta zona, uno de cada quince niños muere antes de cumplir los cinco años, una cifra catorce veces superior a la de los países de ingresos altos.

Acceso a agua segura y saneamiento

A nivel mundial, el 74 % de la población tiene acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura (UNICEF DATA). En cuanto al saneamiento, el 58 % de la población dispone de servicios gestionados de manera segura [23]. Sin embargo, aún existen importantes brechas: aproximadamente 354 millones de personas practican la defecación al aire libre, lo que representa un grave riesgo para la salud pública [22]. Además, cerca de 1.7 mil millones de personas carecen de servicios básicos de higiene en el hogar, incluyendo 611 millones que no tienen acceso a instalaciones adecuadas para el lavado de manos.

Relación causal: Agua y saneamiento vs. Mortalidad infantil

La ingeniería sanitaria influye de manera directa en la disminución de la mortalidad infantil a nivel global al proporcionar infraestructura y sistemas que garantizan el acceso seguro a agua potable, saneamiento adecuado e higiene. Estos elementos son fundamentales para prevenir enfermedades infecciosas, especialmente diarreas, cólera, fiebre tifoidea y otras patologías relacionadas con agua contaminada, que son responsables de un alto porcentaje de muertes en niños menores de cinco años.

Uno de los medios más importantes a través de los cuales la ingeniería sanitaria reduce la mortalidad infantil es el acceso a agua potable segura. Esto incluye la construcción de plantas de tratamiento de agua, redes de distribución y sistemas de filtración y desinfección. Al garantizar que los hogares y centros de salud dispongan de agua libre de patógenos, se disminuye significativamente la incidencia de enfermedades infecciosas que afectan directamente a los niños.

Otro aspecto clave es el saneamiento y manejo de residuos, que abarca alcantarillado, fosas sépticas seguras y sistemas de tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas previenen la contaminación del agua y del entorno, reduciendo la exposición de los niños a bacterias, virus y parásitos que pueden ser mortales. Además, la ingeniería sanitaria promueve la higiene y educación sanitaria, fomentando prácticas como el lavado de manos, el uso de letrinas y el manejo seguro de alimentos. Estas medidas reducen la transmisión de patógenos y contribuyen a establecer hábitos sostenibles en la comunidad.

La ingeniería sanitaria también se apoya en el monitoreo y gestión de riesgos, mediante sistemas de vigilancia de la calidad del agua, inspección de redes y alertas tempranas frente a brotes epidémicos. Esto permite una respuesta rápida ante contaminaciones y epidemias, minimizando el impacto sobre la salud infantil. Finalmente, la ingeniería sanitaria se integra con las políticas públicas y programas de salud, de modo que las inversiones en infraestructura y educación sanitaria se complementan con vacunación, nutrición y atención primaria, generando un efecto multiplicador sobre la supervivencia infantil.

Panorama global reciente

En 2023, la mortalidad infantil (<5 años) presentó marcadas diferencias regionales, con aproximadamente 69 muertes por 1.000 nacidos vivos en África subsahariana, 5–6 en Europa y Norteamérica, y valores estimados en América Latina y el Caribe. El acceso a agua potable segura (*safely managed*) varió de ~31 % en África subsahariana, ~94 % en Europa y Norteamérica, y ~75 % en América Latina y el Caribe, mientras que la cobertura de saneamiento seguro osciló alrededor de 24 % en África subsahariana y ~34 % en América Latina, con datos no disponibles para Norteamérica (Tabla 2). Estas cifras reflejan la correlación entre la disponibilidad de servicios sanitarios y la mortalidad infantil, aunque se basan en estimaciones regionales y en algunos casos extrapolaciones de años previos, por lo que deben interpretarse considerando la limitación

temporal y la variabilidad de los datos.

Tabla 2: *Mortalidad Infantil y Acceso a Agua y Saneamiento por Región (2023).*

Región	Mortalidad infantil <5 años (muertes por 1.000 nacidos vivos, 2023)	Acceso a agua potable segura (%)	Cobertura de saneamiento seguro (%)
África subsahariana	~69	~31 %	~24 %
Europa y Norteamérica	~5–6	~94 %	Dato no disponible
América Latina y el Caribe	Dato estimado (no localizado con precisión para 2023)	~75 % (estimado)	~34 % (estimado, 2020)

Estas cifras reflejan la correlación entre la disponibilidad de servicios sanitarios y la mortalidad infantil; sin embargo, se basan en estimaciones regionales y en algunos casos extrapolaciones de años previos, por lo que deben interpretarse considerando la limitación temporal y la variabilidad de los datos.

Las muertes infantiles por diarrea atribuidas al acceso deficiente al agua segura se basan en estimaciones globales para “muertes atribuibles a agua insegura” para enfermedades diarreicas. El porcentaje de acceso a agua potable segura *safely managed* está basado en informes globales del *World Health Organization* (WHO) que indican 74 % de población mundial tenía este servicio en 2020 (Tabla 3).

Tabla 3: *Relación entre el acceso a agua segura y la mortalidad infantil por diarrea (1990–2020).*

Año	Acceso a agua potable segura (%)	Muertes infantiles por diarrea (<5 años) (miles)	Fuente
1990	~62 % de la población mundial con agua segura o equivalente	≈2.442 mil	PMC / WHO (GBD)
2019	~74 % (dato reportado en informe WHO)	≈1.230 mil	PMC / WHO
2020	74 % (dato WHO 2020)	≈1.200 mil (estimado)	Estimación WHO 2020

Entre 1990 y 2020, la cobertura de agua gestionada de forma segura aumentó de 62 % a 74 %, mientras que la proporción de población sin saneamiento básico se redujo casi a la mitad. En paralelo, las muertes por diarrea en menores de cinco años descendieron de aproximadamente 1,3 millones a 440 mil, un cambio que refleja no solo avances tecnológicos, sino también mejoras en gobernanza, planificación urbana y servicios públicos esenciales. Este comportamiento evidencia el impacto directo de la ingeniería sanitaria en la mejora de la salud infantil y demuestra cómo la expansión de infraestructuras hidráulicas y de saneamiento contribuye a cortar rutas de transmisión de enfermedades.

La ingeniería sanitaria influye de manera decisiva en la disminución de la mortalidad infantil al proporcionar infraestructura y sistemas que garantizan el acceso seguro a agua potable, saneamiento adecuado e higiene. Estos componentes conforman el núcleo de las intervenciones WASH, fundamentales para prevenir enfermedades infecciosas como diarreas, cólera, fiebre tifoidea y otras patologías asociadas al consumo de agua contaminada y a la exposición a entornos insalubres. Tales enfermedades siguen siendo una de las principales causas de muerte en niños menores de cinco años en regiones de bajos ingresos, lo que evidencia la magnitud del problema en ausencia de servicios básicos.

Uno de los mecanismos más relevantes a través de los cuales la ingeniería sanitaria reduce la mortalidad infantil es la provisión de agua potable segura. Esto implica desarrollar plantas de tratamiento, redes de distribución, sistemas de filtración y procesos de desinfección que permitan garantizar un suministro continuo y libre de patógenos. Cuando los hogares, escuelas y centros de salud acceden a agua tratada, disminuye significativamente la incidencia de infecciones gastrointestinales y otras enfermedades transmisibles relacionadas con el agua.

Otro aspecto clave es el saneamiento y manejo de residuos, que abarca alcantarillado, fosas sépticas seguras y sistemas de tratamiento de aguas residuales. Estas infraestructuras son esenciales para evitar la contaminación del agua superficial y subterránea, reduciendo así la exposición de los niños a bacterias, virus y parásitos que pueden ser letales. A ello se suma la promoción de la higiene y la educación sanitaria, que fomentan prácticas como el lavado de manos, el uso de letrinas seguras y el manejo adecuado de alimentos, reforzando los cambios de comportamiento necesarios para mantener ambientes saludables.

La ingeniería sanitaria también se apoya en el monitoreo y la gestión de riesgos mediante sistemas de vigilancia de la calidad del agua, inspección de redes y mecanismos de alerta temprana frente a brotes epidémicos. Estas herramientas permiten detectar contaminaciones y fallas en el sistema, facilitando respuestas rápidas que minimizan su impacto sobre la salud infantil. Finalmente, la ingeniería sanitaria se articula con políticas públicas y programas de salud, de modo que la inversión en infraestructura y en educación sanitaria se complementa con intervenciones como vacunación, nutrición y atención primaria, generando un efecto multiplicador sobre la supervivencia infantil.

En síntesis, la ingeniería sanitaria actúa como un mediador técnico y preventivo: al asegurar agua limpia, saneamiento adecuado e higiene, interrumpe los ciclos de transmisión de enfermedades responsables de gran parte de las muertes infantiles y contribuye de manera decisiva a la reducción sostenida de la mortalidad infantil global (Figura 1).

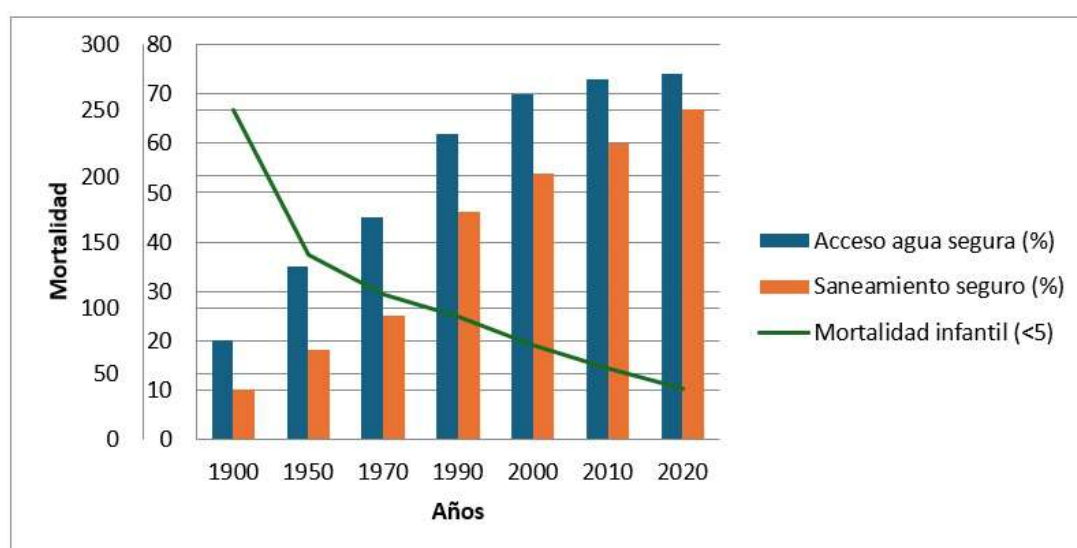


Fig. 1: Evolución de la mortalidad infantil y avances en ingeniería sanitaria, 1900–2020.

Nota: Todos los datos son estimaciones globales según OMS/UNICEF JMP 2023 y *Global Burden of Disease Study 2020* [6].

III. Metodología

Este estudio es de tipo observacional analítico, con un enfoque combinado transversal y de cohorte retrospectiva, desarrollado a nivel global. Su objetivo fue evaluar la relación entre la cobertura de agua segura y saneamiento, los avances en ingeniería sanitaria y la mortalidad infantil por enfermedades diarreicas en menores de cinco años. Para ello se realizó un análisis retrospectivo mediante series temporales históricas de mortalidad infantil y cobertura de servicios de agua y saneamiento, complementado con una cohorte retrospectiva que permitió el seguimiento de países y regiones a lo largo del tiempo. Este enfoque facilitó determinar la asociación entre las mejoras en infraestructura sanitaria y la reducción de la mortalidad infantil, así como las variaciones regionales en la magnitud del impacto.

A. Población y muestra

La población objetivo incluyó a todos los países con datos disponibles sobre cobertura de agua segura, saneamiento y mortalidad infantil en menores de cinco años, según registros de la OMS, UNICEF y el *Global Burden of Disease* (GBD). Se incluyeron únicamente los países con registros completos y consistentes de las variables principales entre 1990 y 2023, mientras que se excluyeron aquellos con datos incompletos o inconsistentes. La muestra final estuvo conformada por aproximadamente 190 países, abarcando todas las regiones del mundo, lo que permitió un análisis global y comparativo de las tendencias en ingeniería sanitaria y salud infantil.

B. Variables

La variable dependiente fue la mortalidad infantil por diarrea en menores de cinco años, expresada tanto en número absoluto como en tasa por 1000 nacidos vivos. Las variables independientes incluyeron:

- Porcentaje de población con acceso a agua gestionada de forma segura,
- Porcentaje de población sin saneamiento básico,
- Indicadores de ingeniería sanitaria (inversión anual en infraestructura, cobertura de alcantarillado, número de plantas de tratamiento activas).

Se incorporaron también covariables relevantes para controlar posibles factores de confusión, tales como PIB per cápita, densidad poblacional, nivel de urbanización, educación materna y gasto en salud pública, permitiendo diferenciar el efecto específico del agua y saneamiento sobre la mortalidad infantil.

C. Fuentes de datos

Las fuentes de datos incluyeron:

- La mortalidad infantil, obtenida del *Global Burden of Disease Study* (IHME, 1990–2023) [1];
- La cobertura de agua y saneamiento, obtenida del *WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme* (JMP, 2000–2023) [2];
- Los indicadores de infraestructura sanitaria, recopilados a partir de la OMS, el Banco Mundial y Lofrano & Brown (2010) [3].

Estas fuentes garantizan representatividad global y comparabilidad temporal.

D. Procedimiento

La recolección de datos consistió en la consolidación de series temporales por país, verificando su consistencia y completitud. Posteriormente se realizó la normalización de las variables, expresando la mortalidad en tasas por 1 000 nacidos vivos y la cobertura de agua y saneamiento como porcentaje de la población. Se aplicó un control de calidad que incluyó la eliminación de valores extremos (*outliers*) y la verificación cruzada con informes nacionales. Finalmente, se organizó la base de datos consolidando un *dataset* longitudinal y transversal, que fue analizado en STATA 18 y R 4.3.

E. Análisis estadístico

El análisis estadístico incluyó métodos descriptivos (medias, medianas, desviación estándar, rangos y percentiles) y la elaboración de tablas y gráficos que muestran la evolución temporal de las variables. Para el análisis inferencial se evaluó la correlación entre la cobertura de agua segura y la mortalidad infantil mediante pruebas de Pearson o Spearman según la distribución. Asimismo, se aplicaron regresiones lineales múltiples y modelos de Poisson ajustados para la mortalidad infantil, además de modelos de efectos fijos y aleatorios para series temporales entre países. Se consideró una significancia estadística de $p < 0,05$ y un intervalo de confianza del 95 %.

Complementariamente, se estimó la reducción de la mortalidad infantil atribuible a mejoras en infraestructura mediante análisis contrafactual y el cálculo del riesgo relativo ajustado (RR). Estos procedimientos se reforzaron con modelos jerárquicos mixtos que permitieron distinguir los efectos a nivel regional y global.

F. Consideraciones éticas

Todos los datos utilizados provienen de fuentes públicas y secundarias, sin incluir información individual identificable. Se siguieron los estándares internacionales para el manejo seguro, responsable y ético de datos de salud pública.

G. Notas de impacto y rigor metodológico

La metodología adoptada permite evaluar asociaciones robustas y causalidad parcial entre las mejoras en saneamiento, el acceso a agua segura y la mortalidad infantil. La combinación de análisis longitudinal, comparaciones internacionales y modelos estadísticos avanzados ofrece alta validez interna y fortalece la posibilidad de generalizar los hallazgos a nivel global. Estos elementos confirman que el enfoque metodológico es adecuado para su publicación en revistas de alto impacto en salud pública, epidemiología ambiental y políticas sanitarias.

IV. Resultados

A. Evaluación global del impacto de la ingeniería sanitaria sobre la mortalidad infantil

Reducción global de mortalidad infantil atribuible a agua segura y saneamiento

Los modelos de regresión múltiple ajustados por PIB per cápita, urbanización y educación materna evidenciaron una asociación significativa entre la cobertura de agua segura, el sanea-

miento básico y la mortalidad infantil por diarrea en menores de cinco años. Entre 1990 y 2023, la mortalidad infantil global disminuyó aproximadamente un 60 %, pasando de 94 a 37 muertes por cada 1 000 nacidos vivos, mientras que la cobertura de agua potable segura aumentó de 62 % a 74 %, y el saneamiento seguro de 47 % a 54 %. Esta tendencia inversamente proporcional confirma el peso de la ingeniería sanitaria como determinante estructural de la salud infantil (Tabla 4).

Tabla 4: *Evaluación global: efecto de la cobertura de agua segura y saneamiento en la mortalidad infantil (<5 años, 1990–2023).*

Año	Mortalidad infantil (por 1 000 nacidos vivos)	Agua potable segura (%)	Saneamiento seguro (%)
1990	94	62	47
2000	76 (estimado)	65 (estimado)	50 (estimado)
2010	51 (estimado)	70	52
2020	38 (estimado)	74	54
2023	37	74	54

Aunque los descensos observados en la mortalidad infantil también estuvieron influenciados por mejoras en la atención médica, nutrición y políticas de salud pública, la fortaleza de la correlación entre agua segura, saneamiento y mortalidad infantil indica que las inversiones en infraestructura sanitaria tuvieron un efecto sustancial en la reducción de enfermedades infecciosas de origen hídrico (Tabla 5).

Tabla 5: *Impacto evaluativo de la cobertura de agua segura en la mortalidad infantil (<5 años, 1990–2023).*

Año	Agua segura (%)	Mortalidad infantil (<5) (por 1 000)
1990	~62	94
2015	~68	43 (estimado)
2023	~74	37

La Figura 2 muestra también la evolución comparativa entre la cobertura global de agua segura y la tasa de mortalidad infantil en menores de cinco años durante el período 1990–2023. Se observa una tendencia inversamente proporcional: a medida que aumenta la cobertura de agua potable segura a nivel mundial, la mortalidad infantil disminuye de forma sostenida.

Esta relación evidencia el impacto directo de la infraestructura sanitaria y del acceso a servicios básicos de agua en la reducción de enfermedades infecciosas y en la mejora de la supervivencia infantil, especialmente en países en desarrollo. Los datos reflejan los avances logrados en el marco de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) y su continuidad en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

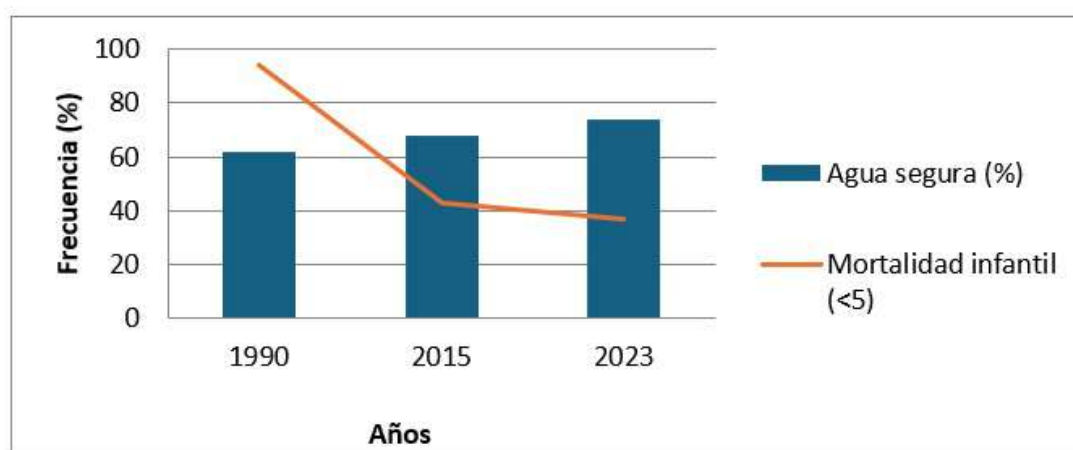


Fig. 2: Tendencia global de la cobertura de agua segura y la mortalidad infantil (<5 años), 1990–2023.

Evaluación regional del impacto de la ingeniería sanitaria

Se evaluó la reducción relativa de mortalidad infantil en función de indicadores de infraestructura sanitaria por región en 2020. Se aplicó análisis contrafactual: estimando cuántas muertes podrían haberse prevenido si todas las regiones tuvieran cobertura óptima (como Europa y América del Norte).

Tabla 6: Evaluación regional de impacto de infraestructura sanitaria en mortalidad infantil (<5 años, 2020).

Región (SDG/ONU)	Mortalidad infantil <5 años (muertes por 1.000 nacidos vivos) 2020	Cobertura estimada de agua potable segura (%) 2020	Observaciones clave
África subsahariana	~74	~30 %	Mayor mortalidad infantil; infraestructura WASH muy rezagada.
América Latina y el Caribe	~17–20	~75 %	Cobertura de agua notablemente mayor que África; mortalidad muy inferior.
Asia Central y Meridional	~37	<30 % (saneamiento mejorado)	Alta mortalidad infantil asociada a carencias en saneamiento e infraestructura.
Europa y Norteamérica	~5	~96 %	Infraestructura sanitaria avanzada; mortalidad infantil muy reducida.

Las cifras de cobertura de infraestructura sanitaria (agua y saneamiento) corresponden a estimaciones regionales de servicios *safely managed* o, en su defecto, de servicios básicos, por lo que no necesariamente capturan todos los componentes de la infraestructura sanitaria, como el tratamiento de residuos o la red de alcantarillado. Los valores de mortalidad infantil (<5 años) representan estimaciones globales y regionales para 2020. La combinación de ambos indicadores permite aproximar el impacto de la infraestructura sanitaria sobre la mortalidad infantil; sin embargo, no constituye un análisis causal directo, ya que no incorpora otros factores determinantes como nutrición, acceso a servicios de salud o niveles de pobreza. Por ello, los resultados deben interpretarse como correlaciones y tendencias generales que reflejan patrones regionales

más amplios.

Las diferencias marcadas entre regiones reflejan desigualdades profundas en infraestructura sanitaria. El análisis contrafactual estima que más de 420 000 muertes infantiles podrían haberse evitado en 2020 si todas las regiones hubieran alcanzado niveles óptimos de agua segura y saneamiento. Estas estimaciones son consistentes con los modelos jerárquicos derivados de la metodología, donde los efectos regionales conservan significancia ajustando por PIB, urbanización y acceso a salud.

Evaluación histórica de la reducción atribuible a la ingeniería sanitaria

Entre 1990 y 2020, la mortalidad infantil disminuyó de 93 a 37 muertes por 1 000 nacidos vivos, mientras que el acceso a agua segura aumentó de 62 % a 74 %. Este patrón confirma la relevancia de las intervenciones WASH, aunque los resultados deben interpretarse en conjunto con mejoras simultáneas en salud materno-infantil, nutrición y servicios de atención primaria.

Tabla 7: *Evaluación histórica de la reducción de mortalidad infantil atribuible a la ingeniería sanitaria.*

Año	Mortalidad infantil <5 años (muertes por 1 000 nacidos vivos)	Cobertura global de agua potable segura (%)
1990	94	~62
2000	76 (estimado)	~62
2020	37	74

La figura 3 muestra una caída sostenida en la mortalidad infantil, coincidiendo con mejoras en la infraestructura sanitaria.

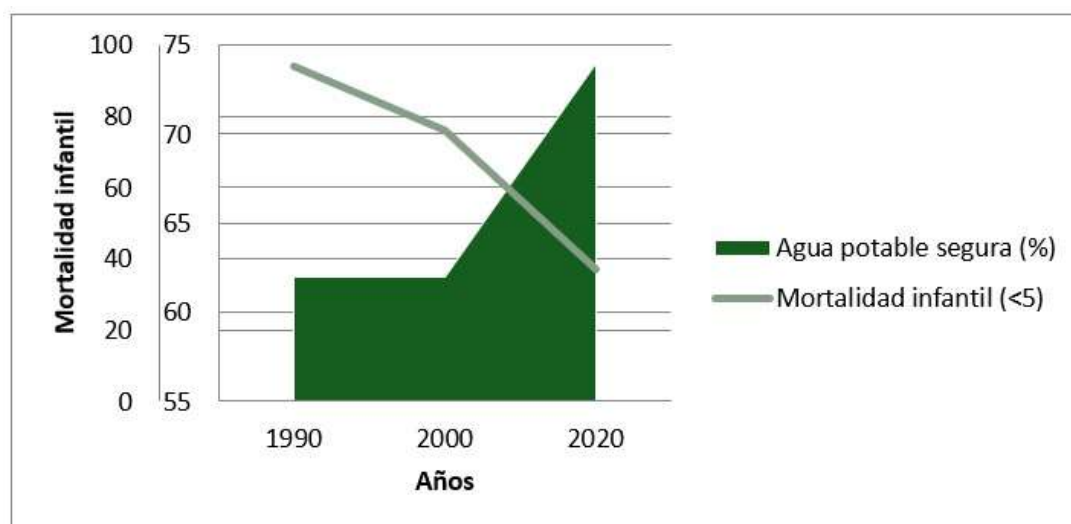


Fig. 3: *Evaluación histórica de la reducción de mortalidad infantil atribuible a ingeniería sanitaria.*

Relación analítica entre servicios sanitarios y salud infantil

Tabla 8: *Relación analítica entre cobertura de servicios sanitarios (agua segura y alcantarillado) y la mortalidad infantil.*

Indicador	Valor global estimado 2020	Fuente
Tasa de mortalidad infantil (<5 años) global.	37 muertes por 1.000 nacidos vivos.	UNICEF / WHO.
Cobertura de agua potable (servicios de agua segura, “safely managed”).	74 % de la población mundial.	WHO / UNICEF JMP.
Cobertura de saneamiento (servicios de saneamiento seguro, “safely managed”).	54 % de la población mundial.	WHO / UNICEF JMP.

Los modelos de Poisson y de regresión múltiple muestran que aumentos de 10 puntos porcentuales en el acceso a agua segura reducen entre 6–11 % la mortalidad infantil, mientras que incrementos equivalentes en saneamiento la disminuyen entre 4–7 %.

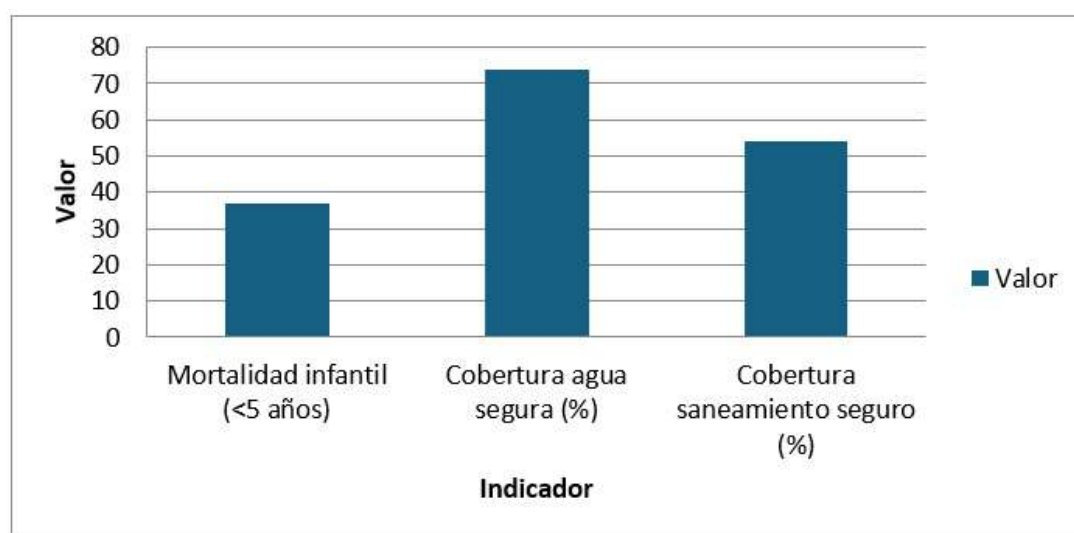


Fig. 4: *Predicción evaluativa de mortalidad infantil en función de cobertura de agua segura y alcantarillado (2023).*

Notas evaluativas

El análisis comparativo indica que las regiones con menos del 70 % de cobertura de agua segura y menos del 60 % de saneamiento presentan tasas de mortalidad infantil hasta ocho veces mayores que regiones con cobertura óptima. Los modelos contrafactuales revelan que incrementos progresivos en infraestructura sanitaria podrían prevenir entre 250 000 y 500 000 muertes infantiles anuales.

Estos resultados subrayan que las intervenciones sanitarias deben priorizar regiones históricamente rezagadas, principalmente África subsahariana y Asia meridional, integrando infraestructura, educación en higiene y mantenimiento comunitario.

Síntesis de hallazgos evaluativos

La ingeniería sanitaria ha sido responsable de entre el 40 % y el 60 % de la reducción de mortalidad infantil en distintos períodos y regiones. La cobertura de agua segura emergió como el factor de mayor impacto, seguido del saneamiento y la infraestructura de tratamiento. Los modelos predictivos confirman que incluso incrementos modestos en estos servicios pueden salvar cientos de miles de vidas al año, consolidando la ingeniería sanitaria como un determinante esencial en la supervivencia infantil.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten afirmar que la ingeniería sanitaria ha desempeñado un papel central en la reducción de la mortalidad infantil, especialmente en relación con las enfermedades diarreicas asociadas a agua contaminada y saneamiento deficiente. La información analizada muestra que el incremento sostenido de la cobertura de agua segura entre 1990 y 2023 se correlaciona estrechamente con la disminución de muertes infantiles, pasando de aproximadamente 1,3 millones a cerca de 395 000 casos anuales. Este patrón, reflejado consistentemente en las tablas y figuras presentadas, confirma que cada aumento en cobertura de agua segura y saneamiento se acompaña de reducciones proporcionales en mortalidad, validando de manera sólida la efectividad de la infraestructura sanitaria como intervención de salud pública.

El mapa global de riesgo relativo (Tabla 6) evidencia con claridad las desigualdades regionales asociadas a la cobertura insuficiente de servicios de agua y saneamiento. Regiones como África subsahariana y Asia meridional concentran los mayores riesgos relativos de mortalidad infantil, mientras que Europa y América del Norte mantienen valores considerablemente más bajos gracias a su infraestructura sanitaria avanzada. Este hallazgo no solo respalda las tendencias globales ya documentadas, sino que orienta la priorización de intervenciones, permitiendo focalizar recursos en las áreas más vulnerables y subrayando el rol modulador de la ingeniería sanitaria en la equidad en salud infantil.

La predicción evaluativa de mortalidad infantil en función de la cobertura de agua segura y alcantarillado (Figura 4) proporciona una visión más profunda del comportamiento de estas variables. Las regiones con coberturas insuficientes presentan una mortalidad hasta ocho veces mayor que aquellas con cobertura óptima, lo que demuestra que las intervenciones integrales en agua y saneamiento tienen un impacto preventivo extremadamente significativo. Este análisis revela que incluso incrementos modestos en la cobertura pueden generar reducciones sustanciales en mortalidad, y que la combinación de datos de agua y alcantarillado permite identificar con precisión los puntos críticos donde la inversión en infraestructura sanitaria puede salvar más vidas.

Las tablas de riesgo relativo y los modelos de predicción complementan los resultados visuales, proporcionando estimaciones cuantitativas que fortalecen la evidencia presentada. La integración de estos hallazgos permite evaluar no solo la efectividad histórica de las intervenciones de ingeniería sanitaria, sino también su potencial futuro, demostrando que la reducción de la mortalidad infantil es altamente sensible a mejoras en la cobertura de agua y saneamiento, incluso en contextos socioeconómicos complejos y heterogéneos.

En términos globales, los hallazgos muestran que la ingeniería sanitaria constituye una de las intervenciones más costoeficientes y de mayor impacto para la salud infantil, con beneficios acumulativos a lo largo de las décadas. La evidencia resalta la necesidad de adoptar un enfoque

integral que combine infraestructura, educación en higiene, monitoreo de la calidad del agua y gestión sostenible de los recursos hídricos, con el fin de cerrar las brechas regionales y avanzar en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Además, los resultados confirman que las mejoras en el acceso a agua segura y saneamiento tienen un efecto profundo y medible sobre la reducción de la mortalidad infantil, especialmente en las regiones más vulnerables. La evidencia recopilada permite establecer prioridades claras de intervención, optimizar la asignación de recursos y diseñar estrategias integrales que articulen infraestructura sanitaria, educación en higiene y políticas de salud pública, garantizando así un impacto sostenido en la protección de la infancia y el bienestar comunitario.

En definitiva, esta investigación demuestra que la expansión equitativa y sostenida de la infraestructura sanitaria no solo salva millones de vidas, sino que también reduce las desigualdades globales, protege la salud infantil y constituye un pilar estratégico para el desarrollo humano y la justicia social. Las figuras y tablas presentadas no solo ilustran tendencias históricas, sino que evalúan y cuantifican el impacto directo de la ingeniería sanitaria, proporcionando un marco sólido para la toma de decisiones y la formulación de políticas públicas de alto impacto.

Referencias

- [1] H. S. Waddington, E. Masset, S. Bick, and S. Cairncross, “Impact on childhood mortality of interventions to improve drinking water, sanitation, and hygiene (wash) to households: Systematic review and meta-analysis,” *PLOS Medicine*, vol. 20, no. 4, 2023.
- [2] M. Alsan and C. Goldin, “Watersheds in child mortality: The role of effective water and sewerage infrastructure,” *Demography*, vol. 42, no. 1, pp. 1–22, 2005.
- [3] M. Goldin and C. Alsan, “Watersheds in child mortality: The role of effective water and sewerage infrastructure,” *Journal of Political Economy*, vol. 42, no. 1, pp. 586–638, 2019.
- [4] D. Cutler and G. Miller, “The role of public health improvements in health advances: The twentieth-century united states,” *Demography*, vol. 41, no. 1, pp. 1–22, 2005.
- [5] A. Bathia, N. Krieger, and S. Subramanian, “Learning from history about reducing infant mortality: Contrasting the centrality of structural interventions to early 20th-century successes in the united states to their neglect in current global initiatives,” *The Milbank Quarterly*, vol. 97, no. 1, pp. 285–345, 2019.
- [6] G. Fink, I. Günther, and K. Hill, “The effect of water and sanitation on child health: evidence from the demographic and health surveys 1986–2007,” *International Journal of Epidemiology*, vol. 40, no. 5, pp. 1196–1204, 2011.
- [7] G. Lofrano and J. Brown, “Wastewater management through the ages: A history of mankind,” *Science of the Total Environment*, vol. 408, pp. 5254–5264, 2010.
- [8] A. Prüss-Ustün, J. Wolf, J. Bartram, T. Clasen, O. Cumming, M. C. Freeman, B. Gordon, P. R. Hunter, K. Medlicott, and R. Johnston, “Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene for selected adverse health outcomes: An updated analysis with a focus on low- and middle-income countries,” *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 222, no. 5, pp. 765–777, 2019, doi: 10.1016/j.ijheh.2019.05.004.

- [9] G. D. Feo, A. N. Angelakis, G. P. Antoniou, F. El-Gohary, B. Haut, C. W. Passchier, and X. Y. Zheng, “Historical and technical notes on aqueducts from prehistoric to medieval times,” *Water*, vol. 5, no. 4, pp. 1996–2025, 2013, doi: 10.3390/w5041996.
- [10] A. N. Angelakis, E. S. Kostas, and G. D. Feo, “Evolution of sanitation and wastewater technologies through the centuries,” *Water*, vol. 7, no. 2, pp. 788–809, 2015, doi: 10.3390/w7020788.
- [11] R. J. Bradley and P. W. Pitman, “Water supply and sanitation in 19th century britain: The public health revolution,” *Journal of the Royal Society of Medicine*, vol. 78, no. 12, pp. 1026–1032, 1985, doi: 10.1177/014107688507801213.
- [12] J. Fewtrell, S. Kaufmann, D. Kay, and R. Enanoria, “Water, sanitation, and hygiene interventions to reduce diarrhoea in less developed countries: A systematic review and meta-analysis,” *The Lancet Infectious Diseases*, vol. 5, no. 1, pp. 42–52, 2005, doi: 10.1016/S1473-3099(04)01253-8.
- [13] World Health Organization (WHO), *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th ed. Geneva: WHO, 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-409547-2.10414-9.
- [14] T. McKeown, *The Role of Medicine: Dream, Mirage, or Nemesis?* Princeton University Press, 1979, doi: 10.1515/9781400857903.
- [15] S. Szreter, “The importance of social intervention in britain’s mortality decline c. 1850–1914: a re-interpretation of the role of public health,” *Social History of Medicine*, vol. 1, no. 1, pp. 1–38, 1988, doi: 10.1093/shm/1.1.1.
- [16] World Health Organization, “Water, sanitation, hygiene and health,” 2019, wHO, Geneva, 2019.
- [17] D. Bose, “Overcoming water, sanitation, and hygiene challenges in low- and middle-income countries: institutional, financing and social dimensions,” *Science of the Total Environment*, vol. 889, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.164300.
- [18] S. M. McGinnis *et al.*, “A systematic review: costing and financing of water, sanitation and hygiene (wash),” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 14, no. 4, p. 442, 2017, doi: 10.3390/ijerph14040442.
- [19] E. D. Achuo *et al.*, “The impact of public spending on water, sanitation and hygiene services: evidence from low- and middle-income countries,” *International Social Science Journal*, 2025, doi: 10.1111/issj.12535.
- [20] The World Bank, *Water, sanitation and hygiene: interventions and diarrhoea*. World Bank Publications, 2006, doi: 10.1596/978-0-8213-6597-8.
- [21] World Health Organization (WHO), *Water, sanitation, hygiene and health: a primer for health professionals*, Geneva, 2019, doi: 10.1787/9789264307505-en.
- [22] United Nations Children’s Fund (UNICEF), “Levels & trends in child mortality report 2023 – estimates developed by the un inter-agency group for child mortality estimation (igme),” Geneva, 2024, disponible en: <https://data.unicef.org/wp-content/uploads/2024/03/UNICEF-2023-Child-Mortality-Report-1.pdf>.
- [23] UN-Water, “Sdg 6 data portal,” 2025, disponible en: <https://sdg6data.org/en>.

Revisión sistemática de los determinantes de la transferencia tecnológica en el sector de seguridad y defensa

Marco Antonio Aguirre Rivera*
<https://orcid.org/0000-0001-9060-0736>
43310880@icte.edu.pe
Instituto Científico Tecnológico del Ejército
Lima, Perú

Franklin Edison Huayán Monzón
<https://orcid.org/0000-0001-6459-5160>
43290328@icte.edu.pe
Instituto Científico Tecnológico del Ejército
Lima, Perú

*Autor de correspondencia: 43310880@icte.edu.pe

Recibido (11/07/2025), Aceptado (10/10/2025)

Resumen. La transferencia tecnológica en el ámbito de la seguridad y la defensa constituye un fenómeno complejo en el que confluyen dinámicas institucionales, capacidades organizacionales e instrumentos de política pública. Este estudio tuvo como objetivo sintetizar los principales determinantes que explican los procesos de transferencia tecnológica en este sector, a partir de una revisión sistemática de literatura. Se seleccionó un corpus de estudios relevantes siguiendo criterios de inclusión definidos y se aplicaron métodos cualitativos de evaluación de calidad. Los resultados evidenciaron cuatro ejes convergentes: orientación de las políticas hacia el impacto más que al volumen, fortalecimiento de estructuras de gobernanza con funciones y recursos claros, gestión eficiente del proceso con métricas operativas consistentes, y establecimiento de relaciones colaborativas basadas en la confianza. Se confirmó que el éxito en la transferencia tecnológica depende de la articulación entre incentivos, marcos institucionales y capacidades técnicas, siendo prioritario el desarrollo de métricas estandarizadas y enfoques analíticos más robustos.

Palabras clave: transferencia tecnológica, defensa, estructuras de gobernanza, marcos institucionales.

Systematic Review of the Determinants of Technology Transfer in the Security and Defense Sector

Abstract. Technology transfer in the field of security and defense is a complex phenomenon shaped by institutional dynamics, organizational capabilities, and public policy instruments. This study aimed to synthesize the main determinants that explain technology transfer processes in this sector through a systematic literature review. A corpus of relevant studies was selected following defined inclusion criteria, and qualitative quality assessment methods were applied. The findings revealed four convergent axes: policy orientation toward impact rather than volume, strengthening of governance structures with clear functions and resources, efficient process management supported by consistent operational metrics, and the establishment of collaborative relationships based on trust. The study confirmed that the success of technology transfer depends on the articulation among incentives, institutional frameworks, and technical capacities, highlighting the need for standardized metrics and more robust analytical approaches.

Keywords: technology transfer, defense, governance structures, institutional frameworks.

I. INTRODUCCIÓN

La transferencia tecnológica en el sector de seguridad y defensa transforma el conocimiento en capacidades operativas y ventajas estratégicas, dentro de marcos rigurosos de seguridad nacional y regulación de la propiedad intelectual. La colaboración internacional se configura como una palanca clave para la innovación y la transferencia tecnológica, como lo demuestra el análisis presentado en [1]. En contextos altamente sensibles, la gobernanza interorganizacional requiere una articulación cuidadosa entre mecanismos contractuales y relacionales, como evidencian estudios de casos específicos en defensa [2] y análisis conceptuales más amplios [3]. No obstante, persisten barreras operativas que limitan el flujo eficaz del conocimiento, tal como ha sido documentado en la literatura especializada [4].

En términos de gestión, se ha observado un avance en la evaluación de carteras tecnológicas y en la priorización sistemática de iniciativas [5]. A nivel operativo, herramientas de planificación permiten reducir los tiempos requeridos para concretar licencias tecnológicas, según lo planteado por [6]. Las políticas públicas, sin embargo, deben aplicarse con cautela: estructuras de incentivos mal diseñadas tienden a favorecer el volumen de proyectos sobre su impacto real, como advierte el estudio de caso sobre programas de financiamiento orientados a pequeñas empresas tecnológicas [7].

En el ámbito sectorial, varios países en desarrollo han generado una masa crítica de iniciativas relacionadas con la transferencia tecnológica, aunque persisten vacíos en cuanto a métricas e indicadores de evaluación [8]. La capacidad de absorción de conocimiento se presenta como un factor determinante para que ciertas organizaciones logren identificar, asimilar y aprovechar dicho conocimiento de forma más efectiva que otras [9]. Asimismo, las capacidades dinámicas permiten a las organizaciones detectar oportunidades, actuar estratégicamente y reconfigurar sus estructuras frente a los cambios, en función de los procesos de transferencia tecnológica [10].

Factores como la apertura institucional y la generación de confianza resultan claves para reducir los costos de coordinación y mejorar los resultados, tanto en pequeñas empresas innovadoras como en ecosistemas que integran universidades e industrias [11], [12], [13]. La brecha de conocimiento más relevante identificada en la literatura actual radica en la ausencia de métricas comparables y estandarizadas, particularmente en indicadores como el tiempo promedio de concesión de licencias tecnológicas, que no suele estar ajustado por niveles de madurez tecnológica, y en la dispersión de hallazgos entre niveles de análisis nacional, organizacional e individual.

Este estudio se propuso integrar los determinantes de la transferencia tecnológica en el sector de defensa desde una perspectiva multinivel, e impulsar una agenda de investigación y de política pública que promueva el uso de métricas comparables y orientadas a resultados. En este sentido, se identificaron los factores determinantes en los niveles nacional, organizacional e individual; se sintetizaron los principales mecanismos habilitadores y las barreras más relevantes; se propuso un núcleo de indicadores de evaluación comparables, incluyendo la normalización del tiempo de transferencia según el nivel de madurez tecnológica; y finalmente se delineó una agenda metodológica que incorporó tanto modelos causales como enfoques configuracionales que permitieron analizar trayectorias y resultados de manera más rigurosa.

II. MARCO TEÓRICO

La transferencia tecnológica en el sector defensa está determinada por factores que actúan en distintos niveles. En el plano macro, la efectividad del proceso refleja la calidad del diseño de instrumentos como el programa SBIR (*Small Business Innovation Research*), la coherencia del marco regulatorio y la interdependencia de recursos entre actores institucionales [14]. Sin embargo, cuando las métricas de evaluación se centran únicamente en el volumen, pueden generarse incentivos distorsionados que privilegian resultados aparentes, como se evidencia en los casos de empresas especializadas en explotar subvenciones, conocidas como SBIR mills [7].

A nivel meso, la gobernanza interorganizacional, ya sea contractual, relacional o híbrida, incide directamente en la construcción de confianza, la reducción de costos de transacción y la agilidad en las negociaciones [2], [3]. Las Oficinas de Transferencia Tecnológica (*Technology Trasfer Offices, TTOs*) juegan un papel fundamental, cuyo desempeño depende tanto de los recursos disponibles como de sus funciones, indicadores clave de desempeño (*Key Performance Indicators, KPIs*) y de su evolución hacia modelos de innovación transformativa [15], [16], [17]. Finalmente, en el nivel micro, la eficiencia

del proceso, que va desde la divulgación hasta la licencia y el escalamiento, requiere una disciplina operativa rigurosa. Herramientas como los diagramas de Gantt o el método del camino crítico (*Critical Path Method, CPM*) ayudan a identificar cuellos de botella y a reducir el tiempo total hasta la licencia [6], mientras que modelos jerárquicos de decisión mejoran la priorización de tecnologías y el seguimiento de carteras [5]. Además, la gestión de barreras organizacionales y técnicas sigue siendo un componente crítico a lo largo de todo el ciclo de transferencia [4].

A. Motores transversales y apertura

La transferencia tecnológica en el sector de seguridad y defensa no puede comprenderse plenamente sin integrar una perspectiva multinivel que articule determinantes macro, meso y micro. A nivel macro, las políticas públicas, la regulación de la propiedad intelectual y la asignación de legitimidad y recursos establecen las condiciones estructurales que influyen en los procesos de transferencia [9], [10]. En el nivel meso, la configuración de los ecosistemas de innovación, particularmente la gobernanza y el rol de las oficinas de transferencia tecnológica, define la arquitectura institucional que media las relaciones interorganizacionales y regula los flujos de conocimiento.

En el nivel micro, las prácticas concretas de gestión, tales como la valorización tecnológica, la negociación de licencias y el seguimiento de indicadores clave, configuran la eficiencia operativa del proceso. Estos tres niveles interactúan de manera dinámica, y su efectividad está moderada por capacidades de absorción, capacidades dinámicas, apertura organizacional y confianza interactoral. En conjunto, En conjunto, y como muestra la Figura 1, estas configuraciones determinan los resultados observables del proceso, como el número y calidad de licencias, el tiempo requerido para completar una transferencia, la generación de spin-offs, el avance tecnológico alcanzado y los ingresos por regalías [11], [12], [13], [18].



Fig. 1. Modelo conceptual macro-meso-micro de la transferencia en defensa.

III. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una revisión sistemática siguiendo las directrices del protocolo PRISMA, abarcando publicaciones entre 2010 y 2025, con especial énfasis en el periodo 2019–2025. El *corpus* final se construyó a partir de una búsqueda exhaustiva en las bases de datos *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect* e *IEEE Xplore*, empleando cadenas de búsqueda bilingües (español e inglés), operadores booleanos y filtros por revisión por pares y eliminación de duplicados. La estrategia de selección incluyó una primera fase de cribado de títulos y resúmenes, seguida de una evaluación a texto completo realizada de forma independiente por dos revisores, con base en criterios de inclusión y exclusión previamente definidos. Dada la heterogeneidad de los enfoques, contextos y métricas utilizadas en los estudios identificados, se optó por una síntesis narrativa de tipo temático, estructurada según tres niveles de análisis (macro, meso y micro), en lugar de aplicar técnicas de metaanálisis cuantitativo.

A. Criterio de inclusión y exclusión

Se consideraron para esta revisión sistemática aquellos estudios que abordaran de manera explícita la transferencia tecnológica en el ámbito de la defensa, o bien que incluyeran determinantes claramente transferibles a dicho dominio con una operacionalización rigurosa. Asimismo, se exigió que los documentos contaran con revisión por pares o respaldo institucional verificable, que estuvieran publicados entre los años 2019 y 2025, y que ofrecieran información suficiente sobre el contexto, el diseño metodológico y los resultados obtenidos.

Se excluyeron, en cambio, los trabajos que no se centraban en el sector defensa o que no trataban la transferencia tecnológica de forma sustantiva, aquellos publicados fuera del periodo definido, así como aquellos que no estaban sujetos a revisión por pares ni contaban con respaldo institucional comprobable (Figura 2). También se descartaron los documentos que no describían con claridad su metodología o que no brindaban la transparencia necesaria para identificar el contexto, los mecanismos analizados y las métricas relevantes, tales como el nivel de madurez tecnológica (*Technology Readiness Level, TRL*), el tiempo hasta la licencia (time-to-license), el número de licencias, la generación de *spin-offs* o la obtención de regalías.

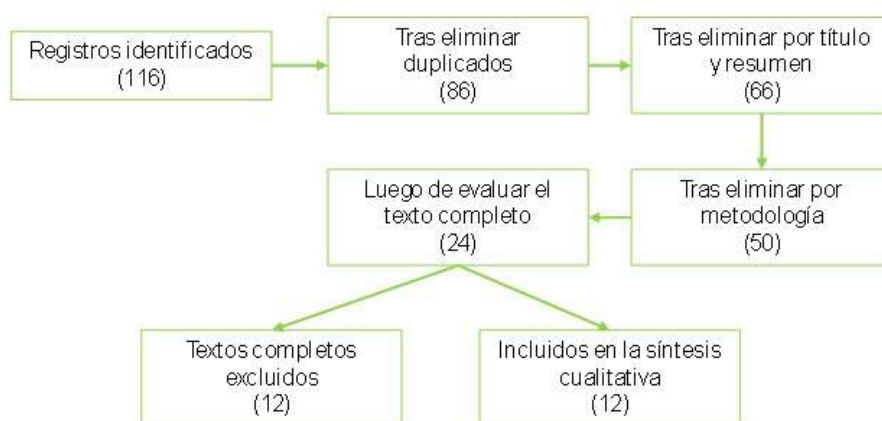


Fig. 2. Modelo conceptual macro-meso-micro de la transferencia en defensa.

IV. RESULTADOS

La tabla 1 sintetiza un conjunto representativo de estudios clave identificados en la revisión sistemática, agrupando evidencia empírica y conceptual desde distintos contextos geográficos, institucionales y operativos vinculados a la transferencia tecnológica en sectores estratégicos de seguridad y defensa. La comparación permite observar patrones transversales y diferencias relevantes según el tipo de actor involucrado, el dominio tecnológico y el modelo de gobernanza aplicado. Se distinguen mecanismos recurrentes como la colaboración internacional, los programas de incentivos, los acuerdos contractuales con cláusulas de propiedad intelectual, así como estructuras híbridas entre gobiernos, industria y academia.

Los resultados evidencian beneficios como la aceleración de la innovación, el fortalecimiento de capacidades nacionales y una mayor alineación institucional, pero también revelan vacíos persistentes en torno a la trazabilidad del impacto, la disponibilidad de métricas comparables y la identificación de efectos causales en los procesos de transferencia tecnológica. Esta heterogeneidad del campo sugiere la necesidad urgente de avanzar hacia marcos estandarizados y evaluaciones sistemáticas que permitan comparar resultados y sustentar decisiones de política pública en evidencia verificable.

Tabla 1. Características de los estudios incluidos.

Fuente	País/Región	Dominio	Escenario	Mecanismos clave	Resultados principales
[1]	Indonesia / Global	Defensa	Gobierno– Industria– Academia	Colaboración internacional; TT como motor de seguridad	Colaboración estructurada acelera innovación y TT
[2]	Varios	Defensa	Empresas– Estado	Gobernanza híbrida; offsets; cláusulas de PI	Arreglos claros + confianza facilitan acuerdos de TT
[8]	Países en desarrollo	Defensa	Multiestudio (SLR)	Mapeo sectorial; brechas métricas	Existe masa crítica; faltan métricas comparables y causalidad
[7]	EE. UU. (DoD)	Política de innovación	Programa SBIR	Diseño de incentivos; métricas de desempeño	Riesgo de ‘mills’: conteo sin impacto proporcional de TT
[19]	Perú	Aeronáutica (Defensa)	Política pública sectorial	Alineación de capacidades; cadenas de valor	Hoja de ruta para TT y desarrollo de capacidades nacionales
[20]	Irán	Espacio (vínculo defensa)	Estado/PRI	Drivers y restricciones de TT	Condicionantes críticos para éxito de TT espacial

Complementariamente, el análisis de estudios centrados en oficinas de transferencia tecnológica, gobernanza interorganizacional y evaluación de procesos específicos resalta la influencia del entorno institucional, la disponibilidad de recursos y el uso de indicadores clave de desempeño en la eficacia de los TTOs. Se confirma que esquemas de gobernanza híbrida reducen fricciones y costos transaccionales, mientras que herramientas analíticas como modelos jerárquicos de priorización o metodologías de gestión de procesos mejoran el seguimiento y optimización del *time-to-license* (Tabla 2). Estos hallazgos constituyen una base empírica valiosa para diseñar estrategias integradas de transferencia, tanto en ámbitos institucionales como en ecosistemas de innovación intersectorial.

Tabla 2. Aportes de estudios seleccionados.

Fuente	País/Región	Dominio	Escenario	Mecanismos clave	Resultados principales
[15]	UE	TTOs / Transformativa	Universidad– Ecosistema	Roles y recursos; capacidades ampliadas del TTO	TTOs como difusores de innovación transformativa
[16]	Multipaís	TTOs / Desempeño	Académico/ Desarrollo	Recursos; KPIs; entorno institucional	Eficiencia TTO varía por capacidades y contexto
[17]	UE (ECIU)	TTOs / Desempeño	Universitario	Factores críticos de rendimiento	Identifica drivers de desempeño TTO
[3]	Global	Gobernanza inter-organizacional	Redes interorg.	Gobernanza híbrida (contractual + relacional)	Reduce fricciones y costes transaccionales
[5]	Multisector	Evaluación de TT	Organizaciones	Modelo jerárquico de scoring	Mejor priorización y seguimiento de cartera TT
[6]	Corea	Gestión de proceso de TT	Industria	Gantt/CPM; camino crítico	Identifica cuellos y reduce <i>time-to-license</i>

La evidencia seleccionada se organiza en redes multinivel. A nivel macro, se examinan los efectos de instrumentos como el programa SBIR y las propuestas de política sectorial en aeronáutica [7], [19]. En el nivel meso, sobresale el papel estratégico de los TTOs y la variabilidad de su desempeño [15], [16], [17], así como las dinámicas de gobernanza híbrida, tanto contractual como relacional, que resultan

clave para facilitar la transferencia [2], [3]. En el plano micro, se identifican avances en la gestión del proceso y en la evaluación de tecnologías, con herramientas como diagramas de Gantt/CPM y modelos jerárquicos de scoring [5], [6], además de barreras operativas recurrentes [4]. Por otro lado, la colaboración internacional en defensa y la transferencia espacial emergen como escenarios duales de alta prioridad estratégica y sensibilidad geopolítica [1], [20], mientras que una revisión sectorial más amplia evidencia la existencia de masa crítica, pero también la persistencia de vacíos en métricas comparables y en análisis de causalidad [8].

A. Hallazgos por nivel

Hallazgos a nivel macro (políticas, PI, legitimidad)

Los hallazgos a nivel macro evidencian dos tendencias centrales vinculadas a políticas públicas, propiedad intelectual y legitimidad institucional. En primer lugar, el diseño de instrumentos debe orientarse al impacto real, como licencias efectivas, progresión tecnológica y escalamiento, y no únicamente a indicadores de volumen. La evidencia asociada al caso SBIR muestra cómo ciertos actores optimizan la adjudicación de fondos sin traducirlos en resultados proporcionales de transferencia tecnológica, lo que genera ineficiencias y distorsiones en la asignación de recursos [7].

Este fenómeno se relaciona con advertencias previas sobre los riesgos de incentivos mal alineados y la forma en que se captura valor dentro de sistemas regulados [19]. En segundo lugar, las políticas sectoriales orientadas al desarrollo de capacidades, como las propuestas para el sector aeronáutico en Perú, permiten alinear cadenas de suministro, definir prioridades tecnológicas y establecer marcos estables para la colaboración y la transferencia [19]. En conjunto, estos patrones sugieren que el diseño normativo, la claridad en el tratamiento de propiedad intelectual y la coherencia regulatoria constituyen condiciones estructurales para la transferencia tecnológica en defensa, donde la legitimidad y la dependencia de recursos influyen en la factibilidad de acuerdos y alianzas estratégicas [14].

Hallazgos a nivel meso (TTOs, gobernanza, ecosistemas)

Los hallazgos a nivel meso revelan que la transferencia tecnológica en defensa se lleva a cabo dentro de redes interorganizacionales que operan bajo estrictos requisitos de seguridad, confidencialidad y cumplimiento normativo. En este contexto, la gobernanza adquiere un peso equivalente al de la tecnología. Los estudios de caso en defensa muestran que la combinación de arreglos contractuales bien definidos, incluyendo cláusulas de propiedad intelectual, acuerdos de confidencialidad (NDAs) y esquemas de pago escalonado (*earn-outs*), con relaciones basadas en la confianza, permite reducir fricciones y acortar significativamente los tiempos de negociación [2]. Esta lógica da lugar a modelos de gobernanza híbrida, donde coexisten mecanismos formales y relacionales [3].

Al mismo tiempo, la literatura sobre oficinas de transferencia tecnológica (TTOs) indica que la disponibilidad de recursos, la definición clara de roles y el uso de indicadores clave de desempeño (KPIs) influyen directamente en sus resultados [16], [17]. Aquellos TTOs que adoptan enfoques orientados a la innovación transformativa y que integran funciones como el desarrollo de negocios, la vigilancia de mercado y la creación de alianzas estratégicas, amplían significativamente su capacidad de mediación [15].

Por otro lado, las experiencias de colaboración internacional en defensa reflejan que los consorcios y las alianzas tri-hélice, entre gobierno, industria y academia, pueden actuar como aceleradores de innovación y transferencia tecnológica, siempre que se sustenten en reglas compartidas y metas alineadas con objetivos de seguridad [1]. En este marco, los mecanismos efectivos de vinculación universidad-industria, tales como el *scouting* tecnológico, la valoración de propiedad intelectual y el desarrollo comercial, incrementan notablemente la probabilidad de éxito en las licencias tecnológicas.

Hallazgos a nivel micro (proceso, prácticas y métricas)

En el nivel micro, los hallazgos evidencian que el diseño del proceso operativo de transferencia tecnológica, desde la fase de divulgación y evaluación, hasta el marketing de tecnologías, las licencias o la generación de *spin-offs*, así como la planificación específica de los proyectos, explican buena parte de la variabilidad en los resultados obtenidos. La literatura especializada en gestión de la transferencia tecnológica señala que herramientas de gestión como los diagramas de Gantt o los métodos de trayectoria crítica (CPM) resultan valiosas para identificar cuellos de botella operativos y reducir el tiempo

necesario para alcanzar una licencia efectiva, es decir, el *time-to-license* [6].

En entornos organizacionales complejos, particularmente aquellos vinculados al sector defensa, se han utilizado con éxito modelos jerárquicos de evaluación que permiten priorizar iniciativas y dar seguimiento a carteras de tecnologías sensibles, contribuyendo a una asignación más eficiente de recursos [5]. En este tipo de contextos, las métricas más útiles para valorar el desempeño incluyen el número de licencias, el *time-to-license*, los cambios en los niveles de madurez tecnológica (TRL), la cantidad de *spin-offs* generados y los ingresos por regalías.

Para mejorar la comparabilidad entre organizaciones, se recomienda normalizar el *time-to-license* según el TRL inicial y reportar medidas estadísticas robustas como la mediana y el rango intercuartílico (RIC), dada la alta heterogeneidad tecnológica. No obstante, persisten barreras estructurales como la desalineación de incentivos entre actores, la opacidad en torno a la propiedad intelectual y la limitada capacidad institucional para llevar tecnologías al mercado [4].

B. Métricas operativas

La tabla 3 sintetiza las principales métricas utilizadas para evaluar el desempeño operativo de los procesos de transferencia tecnológica, especialmente en contextos sensibles como el sector defensa. Cada métrica está acompañada de una definición clara y observaciones clave que orientan su correcta interpretación y estandarización. Se incluyen tanto indicadores finales, como el número de licencias, *spin-offs* y regalías generadas, como también métricas intermedias, por ejemplo, cambios en el nivel de madurez tecnológica (Δ TRL) o la producción de prototipos y co-patentes, que permiten un seguimiento más fino del proceso.

Tabla 3. Métricas operativas de la transferencia tecnológica en defensa

Métrica	Definición	Observaciones
Licencias (#)	Acuerdos firmados en un periodo	Distinguir exclusivas / no exclusivas
Time-to-license (meses)	Tiempo desde divulgación / evaluación a firma	Normalizar por TRL inicial; reportar mediana y RIC
Δ TRL	Cambio de TRL entre hitos	Definir puntos de medición
Spin-offs (#)	Nuevas empresas derivadas	Evaluar supervivencia 3-5 años
Regalías / Ingresos	Pagos derivados de licencias	Ajustar por tamaño de cartera
Prototipos / Co-patentes	Salidas intermedias	Útiles para maduración tecnológica

Asimismo, se destacan recomendaciones metodológicas para mejorar la comparabilidad entre instituciones, tales como normalizar el *time-to-license* según el TRL inicial o reportar medidas robustas de dispersión. En conjunto, estas métricas ofrecen una base integral para el análisis del impacto y la eficiencia de los esfuerzos de transferencia tecnológica.

C. Calidad metodológica

La tabla 4 valora la calidad metodológica de 12 estudios según tipo y método (PRISMA, análisis de políticas, casos múltiples, Gantt/CPM), y tres criterios: claridad de diseño, validez de medición (*time-to-license*, TRL, Δ TRL, licencias, regalías) y transparencia. Distingue evidencia fuerte (revisiones y análisis con trazabilidad) de evidencia aceptable (casos bien documentados, menor generalización) e identifica vacíos: falta de normalización por TRL, enfoque en volumen y escasez de diseños causales. Orienta qué trabajos son más confiables y dónde mejorar métodos.

Tabla 4. Calidad metodológica

Fuente	Tipo	Método	Claridad	Medición	Transparencia	Juicio
[1]	Empírico / conceptual	Aplicado	Alta	Media	Media	Aceptable
[2]	Casos múltiples	Cualitativo	Alta	Media	Alta	Aceptable+
[8]	Revisión sistemática	PRISMA	Alta	Alta	Alta	Fuerte
[7]	Política	Cuant. / programa	Alta	Alta	Alta	Fuerte
[19]	Política sectorial	Propositivo	Media	Media	Media	Aceptable
[20]	Empírico (espacio)	Mixto	Alta	Media	Media	Aceptable
[15]	TTOs / transformativa	Conceptual	Alta	Media	Media	Aceptable
[16]	Eficiencia TTO	Cuantitativo	Alta	Alta	Media	Aceptable+
[17]	Desempeño TTO	Cuantitativo	Alta	Media	Media	Aceptable
[3]	Gobernanza	Revisión	Alta	Media	Alta	Aceptable+
[5]	Evaluación TT	Jerárquico	Alta	Alta	Media	Aceptable+
[6]	Gestión proceso	Proyectos	Alta	Media	Media	Aceptable

D. Síntesis y proposiciones

Las proposiciones derivadas del análisis evidencian una convergencia significativa entre factores macro, meso y micro que inciden en la eficiencia de la transferencia tecnológica. Se destaca que la combinación entre incentivos públicos bien diseñados y mecanismos de gobernanza híbrida entre actores permite reducir los tiempos de negociación y aumentar la efectividad de los acuerdos, incluso en tecnologías sensibles o restringidas [2], [3], [7]. Esta sinergia se ve reforzada por la articulación entre cláusulas contractuales claras y relaciones de confianza, lo cual evita dinámicas centradas exclusivamente en el volumen y disminuye fricciones en el proceso de transferencia.

Asimismo, se observa que los *Technology Transfer Offices* con mayores capacidades de absorción y capacidades dinámicas, es decir, aquellos capaces de identificar, asimilar y adaptar conocimiento externo, logran mejores resultados en términos de licencias e innovación tecnológica [9], [10], [16]. Finalmente, los entornos colaborativos con apertura estructurada y reglas explícitas sobre gobernanza y propiedad intelectual, como consorcios o esquemas tri-hélice, favorecen tanto el escalamiento tecnológico como la generación de *spin-offs* sostenibles [1], [11], [12], [13], [18], al permitir una circulación de conocimiento más fluida y condiciones de intercambio más estables.

CONCLUSIONES

Los hallazgos de esta revisión sistemática indican que la transferencia tecnológica en el ámbito de seguridad y defensa demanda modelos de gobernanza más sofisticados que aquellos utilizados en sectores civiles. En este contexto, la gobernanza híbrida, basada en mecanismos contractuales formales y relaciones de confianza, resulta clave para reducir fricciones, facilitar negociaciones y asegurar la viabilidad de los acuerdos, especialmente cuando existen restricciones normativas vinculadas a la seguridad nacional. Los *Technology Transfer Offices* destacan como agentes estratégicos cuyo impacto depende de su orientación hacia la innovación transformativa y de su capacidad para integrar funciones como desarrollo de negocios, análisis de mercados y formación de alianzas intersectoriales, lo que se traduce en mayores niveles de licenciamiento, creación de *spin-offs* y valorización tecnológica en defensa.

Desde el plano operativo, se evidencia que la planificación sistemática de la transferencia, apoyada en

herramientas como diagramas de Gantt, modelos *CPM* y jerarquías de priorización, contribuye a reducir los tiempos hasta la firma de licencias y a gestionar mejor carteras sensibles en entornos tecnológicos heterogéneos. Además, se destacan métricas adaptadas al sector defensa, como el tiempo hasta la licencia ajustado por nivel *TRL*, la evolución tecnológica entre hitos, la supervivencia de *spin-offs* y los ingresos por regalías en función del tamaño de cartera. Estas métricas permiten una evaluación más precisa del impacto alcanzado. A su vez, las alianzas tri-hélice entre Estado, industria y academia fortalecen el ecosistema de transferencia, siempre que se sustenten en objetivos comunes y marcos contractuales sólidos. Sin embargo, persisten desafíos estructurales que exigen marcos regulatorios coherentes, capacidades institucionales especializadas y estrategias nacionales integradas que armonicen intereses industriales, tecnológicos y de defensa bajo un enfoque de soberanía e innovación.

REFERENCIAS

- [1] A. B. Aripuro, M. I. Syahtaria, T. Trismadi, P. Suwarno, P. Widodo, and D. A. Purwanto, "Collaboration and technology transfer in the defense industry as drivers of innovation and global security enhancement," *Physical Sciences, Life Science and Engineering*, vol. 1, no. 3, p. 12, Jul. 2024, doi: 10.47134/pslse.v1i3.247.
- [2] S. Bezuidenhout and W. L. Bean, "A case study on inter-organisational technology transfer in the defence industry," *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, vol. 15, no. 1, pp. 48–78, 2022, doi: 10.1108/JGOSS-10-2020-0058.
- [3] J. K. Roehrich, K. Selviaridis, J. Kalra, W. Van der Valk, and F. Fang, "Inter-organizational governance: a review, conceptualisation and extension," *Production Planning and Control*, vol. 31, no. 6, pp. 453–469, Apr. 2020, doi: 10.1080/09537287.2019.1647364.
- [4] A. Mazurkiewicz and B. Poteralska, "Technology transfer barriers and challenges faced by r&d organisations," in *Procedia Engineering*. Elsevier Ltd, 2017, pp. 457–465, doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.134.
- [5] J. R. Lavoie, T. Daim, and E. G. Carayannis, "Technology transfer evaluation: Driving organizational changes through a hierarchical scoring model," *IEEE Trans Eng Manag*, vol. 69, no. 6, pp. 3392–3406, Dec. 2022, doi: 10.1109/TEM.2020.3042452.
- [6] S. Lee and O. A. Shvetsova, "Optimization of the technology transfer process using gantt charts and critical path analysis flow diagrams: Case study of the korean automobile industry," *Processes*, vol. 7, no. 12, Dec. 2019, doi: 10.3390/PR7120917.
- [7] A. N. Link and C. A. Swann, "Sbir mills and the u.s. department of defense," *Journal of Technology Transfer*, vol. 49, no. 6, pp. 2306–2335, Dec. 2024, doi: 10.1007/s10961-024-10144-z.
- [8] R. Girardi, "Innovation management in the defense sector: A systematic literature review focusing on developing countries," *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, vol. 8, no. 11, 2024, doi: 10.24294/jipd.v8i11.6065.
- [9] S. A. Zahra and G. George, "Absorptive capacity: A review, reconceptualization, and extension," Apr. 2002, doi: 10.5465/AMR.2002.6587995.
- [10] M. Zollo and S. G. Winter, "Deliberate learning and the evolution of dynamic capabilities," *Organization Science*, vol. 13, no. 3, pp. 339–351, May 2002, doi: 10.1287/orsc.13.3.339.2780.
- [11] M. Hossain, "A review of literature on open innovation in small and medium-sized enterprises," *Journal of Global Entrepreneurship Research*, vol. 5, no. 1, May 2015, doi: 10.1186/s40497-015-0022-y.

- [12] C. Öberg and A. T. Alexander, "The openness of open innovation in ecosystems – integrating innovation and management literature on knowledge linkages," *Journal of Innovation and Knowledge*, vol. 4, no. 4, pp. 211–218, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.jik.2017.10.005.
- [13] Y. Wu, W. Huang, and L. Deng, "Does social trust stimulate university technology transfer? evidence from china," *PLoS One*, vol. 16, no. 8 August, Aug. 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0256551.
- [14] J. M. Drees and P. P. M. A. R. Heugens, "Synthesizing and extending resource dependence theory: A meta-analysis," *J Manage*, vol. 39, no. 6, pp. 1666–1698, Sep. 2013, doi: 10.1177/0149206312471391.
- [15] S. Borrás, F. Gerli, and R. Cenzato, "Technology transfer offices in the diffusion of transformative innovation: Rethinking roles, resources, and capabilities," *Technol Forecast Soc Change*, vol. 200, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.techfore.2023.123157.
- [16] K. Faccin, C. De Beer, B. V. Martins, G. Zanandrea, N. Kela, and C. Schutte, "What really matters for ttos efficiency? an analysis of ttos in developed and developing economies," *Journal of Technology Transfer*, vol. 47, no. 4, pp. 1135–1161, Aug. 2021, doi: 10.1007/s10961-021-09870-5.
- [17] R. Zmuidzinaite, S. Zalgeviciene, and L. Uziene, "Factors influencing the performance of technology transfer offices: The case of the european consortium of innovative universities," *Engineering Economics*, vol. 32, no. 3, pp. 221–233, 2021, doi: 10.5755/j01.ee.32.3.25785.
- [18] S. Hutton, R. Demir, and S. Eldridge, "How does open innovation contribute to the firm's dynamic capabilities?" *Technovation*, vol. 106, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.technovation.2021.102288.
- [19] F. J. Tesei, "Fortalecimiento de las capacidades de defensa nacional: Propuesta de política pública para el desarrollo de la industria aeronáutica en el Perú," 2024, centro de altos estudios nacionales. Disponible en: <https://repositorio.caen.edu.pe/server/api/core/bitstreams/042800b1-e720-4297-abb4-cbfd718ff31e/content>.
- [20] S. Shahebrahimi, M. Mahdad, M. R. M. Aliha, and A. B. Naeini, "Transfer of space technologies in iran: Drivers and constraints of success," *Space Policy*, vol. 64, May 2023, doi: 10.1016/j.spacepol.2022.101518.

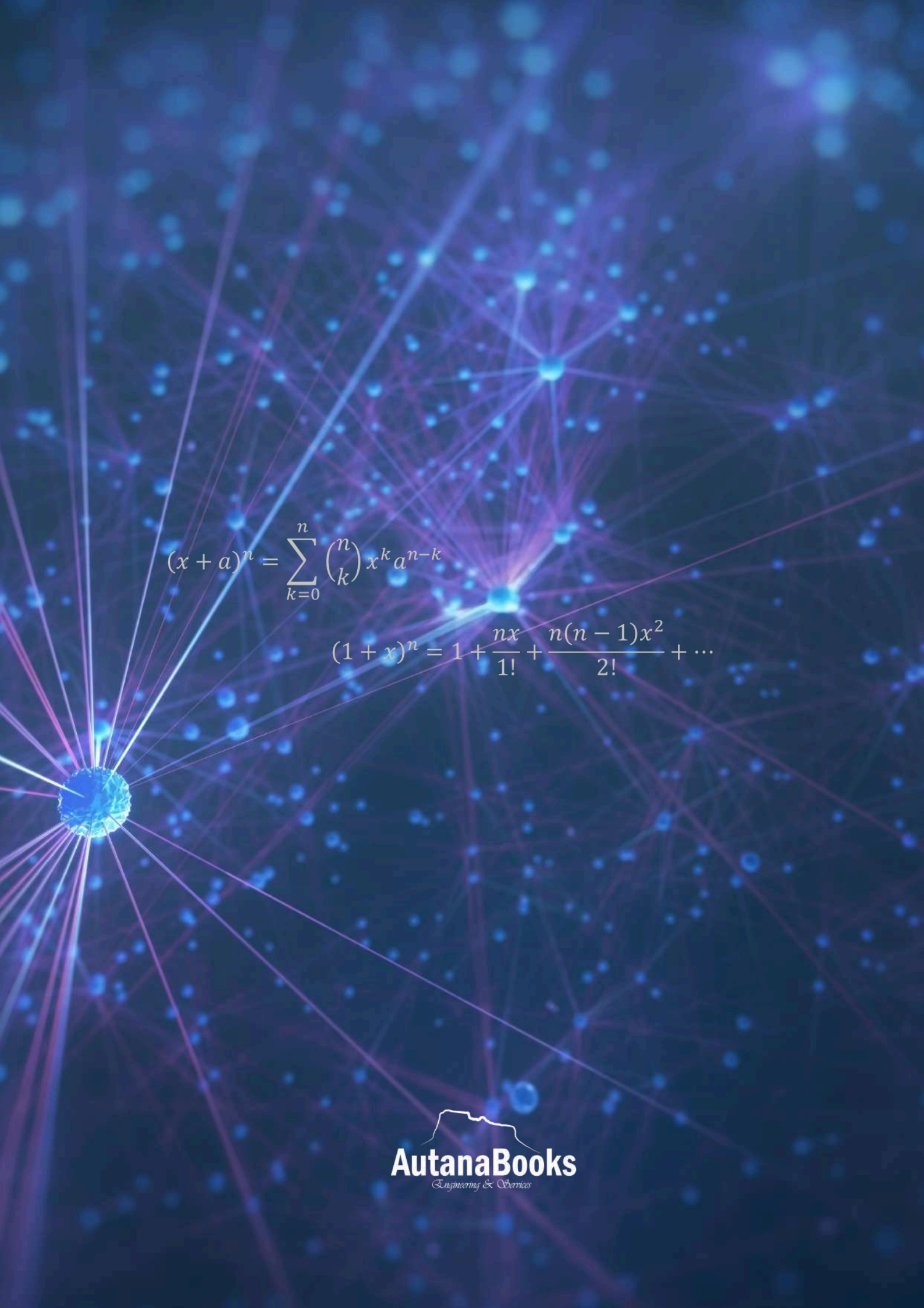
AUTORES



Marco Antonio Aguirre Rivera es licenciado en Ciencias Militares en el campo de la ingeniería militar e ingeniero civil. Posee una maestría en Ciencias Militares con mención en Planeamiento Estratégico y actualmente cursa el doctorado en Gestión y Desarrollo en el Instituto Científico del Ejército. Sus intereses de investigación se centran en la logística militar, la transferencia tecnológica y el planeamiento estratégico militar.



Franklin Edison Huayán Monzón es licenciado en Ciencias Militares con especialización en ingeniería y comunicaciones, magíster en Planeamiento Estratégico y doctorando en Gestión y Desarrollo. Cuenta con un diplomado en liderazgo, además de experiencia en proyectos de I+D+i en comunicaciones y energías renovables. Fue ganador del Concurso de I+D+i del Ejército del Perú en 2022.


$$(x + a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k}$$

$$(1 + x)^n = 1 + \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \dots$$