FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

INGENIO

VOL. 9. No. 1, 2026 | e- ISSN 2697-3243 | ISSN 2588-0829

INGENERÍA, INNOVACIÓN E INVESTIGACIÓN

Revista Ingenio es una revista semestral de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Central del Ecuador fundada en el año 2017 | Vol. 9, núm. 1 | julio - diciembre 2025 | p-ISSN 2588-0829 e-ISSN 2697-3243 |

Autoridades
Dr. Patricio Héctor Aurelio Espinosa del Pozo, Ph.D.
Rector de la Universidad Central del Ecuador

Consejo Editorial
Ing. Robert Enríquez Reyes, Ph.D., Editor en Jefe, Universidad Central del Ecuador, ECUADOR
Ing. Abel Remache Coyago, MSc., Editor Académico, Universidad Central del Ecuador, ECUADOR
Mgs. Tatiana Freire, Dipl., Editora de Sección, Universidad Central del Ecuador, ECUADOR
Mgs. Paulina Zary, Correctora de Estilo, Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR
Dr. Jhohannes Rittz, MA., MIB., Ph.D. (c), Miembro, EU Business School Munich, ALEMANIA
Dra. Teresa Magal-Royo, Ph.D, Miembro, Universidad Politécnica de Valencia, ESPAÑA
Dr. Andrés Vivas Albán, Ph.D., Miembro, Universidad del Cauca, COLOMBIA
Dr. Boris Heredia Rojas, Ph.D., Miembro, Universidad del Norte, CHILE
Dr. Jaime Duque Domingo, Ph.D., Miembro, Universidad de Valladolid, ESPAÑA
Dr. Giovanni Herrera Enríquez, Ph.D., Miembro, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, ECUADOR
Dr. José Luis Paz, Ph.D., Miembro, Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR
Dr. Jesús López Villada, Ph.D., Miembro, Universidad Internacional SEK, ECUADOR
Dr. Michel Vargas, Ph.D., Miembro, Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR
Dr. Andrés Robalino-López, Ph.D., Miembro, Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR
Dr. Kiyanoosh Golchin Rad, Miembro, Pukyong National University, SOUTH KOREA
Dr. Ali Bagheri Fard, Miembro, George Brown College, CANADÁ
Ing. Hamid Aadal, M.Sc., Miembro, Science & Technology Innovation-ADF, IRÁN
Dra. Esther Campos Serrulla, Ph.D., Miembro, Universidad Europea de Madrid, ESPAÑA
Dr. Alberto Sánchez, Ph.D., Miembro, Escuela de Ingenierías Industriales-UVA, ESPAÑA
Dra. Diana Ayala, Ph.D., Miembro, Universidad de Santo Tomás, COLOMBIA
M.Eng. Jaime Gómez García-Bermejo, PhD., Miembro, University of Valladolid, SPAIN
Dra. Yolanda Vásquez Bernal, Miembro, Universidad Tecnológica de Panamá, PANAMÁ
Dr. Majid Khorami, Miembro, Universidad Tecnológica Equinoccial-UTE, ECUADOR
Dr. Diego Echeverría Jurado, Miembro, Operador Nacional de Electricidad – CENACE, ECUADOR

Consejo Asesor y Evaluador
Ing. María Fernanda Trujillo, Ph.D., Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR
Ing. Fabricio Rivadeneira, Ph.D., Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí-ULEAM, ECUADOR
Ing. Jazcar Bravo, M.sc., Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-UNAN, NICARAGUA
Ing. Salvatore Reina, Ph.D., Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR
Ing. Saira Urbina Cienfuegos, MSc., Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-UNAN, NICARAGUA
Ing. Alexander Torre, MSc., Universidad Politécnica Salesiana-UPS, ECUADOR
Dra. Vanessa Erazo, Obuda University-OU, HUNGRIA
Dr. Ricardo Arciniega, Obuda University-OU, HUNGRIA
Ing. Carlos Ramírez, MSc., Maquinaria Industrial-BKB, ECUADOR
Ing. Luis Hernández Rodriguez, Ph.D., Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR
Ing. Diego Sosa Caiza, Ph.D., Universidad Tecnológica Equinoccial-UTE, ECUADOR
Dr. Miguel Guerra, Universidad San Francisco de Quito-USFQ, ECUADOR
Davood Daneshgar, Ph.D., Yazd University-YU, IRÁN
Ing. Holger Santillán, Ph.D.(c), Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR
Ing. Peregrina Wong, MSc., Ph.D.(c), Instituto Superior Tecnológico Simón Bolívar-ITSB, ECUADOR
Dr. Cristian Laverde, Universidad Técnica Estatal de Quevedo-UTEQ, ECUADOR
Ing. Gabriel Rojas, MSc., Universidad Nacional de Loja-UNL, ECUADOR
Ing. Alejandro Toapanta, MSc., Universidad Politécnica Estatal del Carchi-UPEC, ECUADOR
Arq. Gabriela Mejía, Ph.D.(c), La Pontificia Universidad Católica del Ecuador-PUCE, ECUADOR
Arq. Marcelo Ramos Soto, MDAA, Uribe Schwarzkopf, ECUADOR
Dr. Jorge Guillermo Calderón, Ph.D., Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
Análisis de Redes INEEL, MÉXICO
Ing. Rogger Peña, MSc., Instituto Superior Tecnológico Simón Bolívar-ITSB, ECUADOR
Ing. Jhonny Figueroa Rivera, MSc., Instituto Superior Tecnológico Bolivariano de Tecnología-ITB, ECUADOR
Pablo Suasnavas, MSc., Ph.D.(c), Universidad Internacional SEK-UNISEK, ECUADOR
Mgtr. Alfonsina Rodríguez, Universidad Internacional SEK-UNISEK, ECUADOR

Este número estuvo bajo la coordinación editorial del
Dr. Robert Enríquez Reyes, Mgs. Tatiana Freire, Dipl.,
Ing. Elizabeth Salazar, MSc. y Sr. Kevin Sainz

Revista Ingenio
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec
vicedecanat.fing@uce.edu.ec
http://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/index

Sitio web:
http://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/index
Correo electrónico:
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

ISSN impresa 2588-0829
ISSN electrónica 2697-3243

Director | MSc. Edison Benavides
Diagramación | Tnlg. Edison Pila
Corrección de textos | MSc. Jhonatan Salazar
Portada | Carrera de Ingeniería en Diseño Industrial,
Universidad Central del Ecuador

Editorial Universitaria, 2026
Ciudadela Universitaria, av. América, s. n.
Quito, Ecuador
+593 (02) 2524 033
editorial@uce.edu.ec

CC BY-NC-SA 4.0 DEED
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

Los contenidos pueden usarse libremente, sin fines comerciales y siempre y cuando se cite la fuente. Si se hacen cambios de cualquier tipo, debe guardarse el espíritu de libre acceso al contenido.

ÍNDICE

ARTÍCULO ORIGINAL

Diseño e Implementación de un Robot Autónomo para Jardinería Urbana 5
Charre-Ibarra S., Espinosa-Vázquez R., Alcalá-Rodríguez J.

Clasificación de Cáncer de Mama con
Implementación de Técnicas de Análisis de Componente Principal 15
León-Alarcón J., Cedeño-Menéndez R.

Simulación Basada en FPGA de un Servicio Wi-Fi Abierto
Utilizando la Plataforma SDR de Dispositivos Analógicos 26
Santillan-Carranza H., Rodríguez-Calderón A., García-Badaraco E.

Morfología y Estructura Urbana como Indicadores
de Sostenibilidad en Crucita la Bella, Manabí, Ecuador 34
Álvarez-Ochoa J., Zambrano-Ochoa C.

Desarrollo de un Sistema de Visión Artificial
para la Detección no Destructiva de Plátanos 51
Durán-Fonseca M., Padilla-Ayala J., Gudiño-Laun J., Charre-Ibarra S., Alcalá-Rodríguez J.

Uso de Certificados de Defunción para Estimar las Muertes Laborales
por Caídas desde Altura en la Industria de la Construcción en Ecuador, 2013-2023 60
Gómez-García A.

ESTUDIO DE CASO

Impacto de Fuentes Renovables en la Frecuencia del Sistema de Potencia 66
Calderón-Guizar J.

Evaluación Estructural del Edificio de Administración de
Ingeniería química de la Universidad Central del Ecuador
Aplicando la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 (NEC15) 72
Siguenza-Flores A., Sunta-Zapata D., Machado-Salazar L., Barros-López J.

Valoración de Bim-Facility Management para la
Potencialización de Infraestructura Deportiva. Caso de Estudio. 89
Maldonado-García A., Alvansazyazdi M.

REVISIÓN SISTEMÁTICA

Sistemas Logísticos Integrales: Impacto en la Competitividad y en el Desempeño de las Cadenas de Suministros 97
Luz Valdez-Lima L., Suárez-Carreño F.

ARTÍCULO ORIGINAL (TEÓRICO-TÉCNICO)

UpGrid: Integración Flexible de Generación Distribuida en Redes de Baja y Media Tensión Mediante Sistemas de Control Avanzados (Portugal) 107
Puente-Bosquez S., Laverde-Alvaracín C., Pisco-Vanegas J., Fuentes-Véliz J.

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

INGENIO
2026, VOL 9(1), ENERO - JUNIO, PP. 005-014

REVISTA INGENIO

Diseño e Implementación de un Robot Autónomo para Jardinería Urbana

Desing and implementation of an Autonomous Robot for Urban Gardening

Saida Miriam Charre Ibarra | Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica (México)
Rogelio Espinosa Vázquez | Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica (México)
Janeth Aurelia Alcalá Rodríguez | Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica (México)
Jorge Gudiño Lau | Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica (México)
Miguel Ángel Durán Fonseca | Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica (México)

Recibido: 2/6/2025
Recibido tras revisión: 11/9/2025
Aceptado: 8/10/2025
Publicado: 28/1/2026

PALABRAS CLAVE
Robot, automatización, agricultura, tecnología.

RESUMEN
El trabajo presenta el diseño e implementación de un robot autónomo orientado al cuidado y mantenimiento de jardines urbanos, automatizando tareas esenciales como la siembra, el riego y el monitoreo del estado de las plantas. Este sistema combina componentes mecánicos, electrónicos y de control que permiten un funcionamiento eficiente, preciso y adaptado a las necesidades del espacio hortícola. Debido a la integración de sensores, el robot puede recopilar datos en tiempo real para ajustar sus acciones, optimizando así el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Su estructura mecánica está basada en un diseño cartesiano que facilita el desplazamiento en el área de trabajo. Además, cuenta con una interfaz visual que permite la supervisión y control remoto en tiempo real, facilitando la monitorización del cultivo y el mantenimiento del sistema. Los resultados experimentales mostraron que el robot puede realizar varias tareas automatizadas, demostrando la funcionalidad del prototipo. El sistema propuesto contribuye a promover espacios verdes en zonas urbanas y apoya la agricultura sustentable mediante tecnologías abiertas y automatización.

KEY WORDS
Robot, automation, agriculture, technology.

ABSTRACT
This study presents the design and implementation of an autonomous robot for the care and maintenance of urban gardens, focusing on the automation of essential tasks such as sowing, irrigation, and plant monitoring. The system integrates mechanical, electronic, and control components to achieve efficient and precise operation adapted to horticultural environments. Equipped with sensors, the robot collects real-time data to dynamically adjust its actions, thereby optimizing plant growth and overall system performance. Its Cartesian-based mechanical structure allows accurate movement throughout the work area, while a graphical user interface enables real-time monitoring and remote control of both the crops and the robotic system. Experimental results confirm the robot's ability to perform multiple automated tasks effectively, validating the functionality and reliability of the prototype. The proposed approach contributes to the development of sustainable urban agriculture and the promotion of green spaces through the application of open-source technologies and automation.

1. INTRODUCCIÓN

La robótica representa una de las tecnologías con mayor capacidad para revolucionar tanto el ámbito laboral como la vida cotidiana. Tal como expone Mercader [1], se trata de un indicador claro de avance y sofisticación tecnológica. Aquellos países y organizaciones que han incorporado de forma significativa sistemas robóticos no solo mejoran su productividad y competitividad, sino que también refuerzan su imagen como sociedades modernas e innovadoras. En los contextos más desarrollados, la inversión en robótica ha experimentado un crecimiento considerable, muy superior al de otros sectores tecnológicos. A pesar de ello, el conocimiento general sobre esta disciplina sigue siendo escaso entre la población.

Mercader [1] también plantea que uno de los objetivos fundamentales de la robótica es apoyar o reemplazar

https://doi.org/10.29166/ingenio.v9i1.8355
2025 Universidad Central del Ecuador
CC BY-NC 4.0 —Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional
pISSN 2588-0829
eISSN 2697-3243
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

a los seres humanos en actividades repetitivas, riesgosas o poco gratificantes. En determinadas industrias, estas soluciones ya se implementan a gran escala, mostrando su eficacia y potencial.

Además, esta tecnología ofrece beneficios sociales importantes, ya que permite enfrentar diversos retos en ámbitos muy variados, aportando soluciones útiles para todas las edades y sectores. Contribuye así a mejorar la calidad de vida al disminuir la carga de trabajo y reducir los riesgos asociados a determinadas tareas [2]. Su evolución constante impulsa una mejora continua en sus capacidades y amplía las posibilidades de aplicación en numerosos campos.

Los sectores y aplicaciones de la robótica incluyen una variedad de áreas en las que los robots cumplen funciones específicas para mejorar procesos y servicios. Los sectores destacados son:

- Industria del automóvil
- PYMES (Pequeñas y Medianas Empresas)
- Industria manufacturera pequeña
- Sector alimentario
- Sectores productivos de compleja robotización
- Agricultura
- Construcción
- Servicios al ciudadano
- Uso doméstico
- Educación y entretenimiento
- Sanidad (salud)
- Investigación
- Medio ambiente

Estas aplicaciones muestran cómo la robótica está presente en diversas áreas, contribuyendo tanto a la productividad como a la calidad de vida [3].

En consecuencia, la robótica se perfila como un área en expansión que demanda una formación sólida y actualizada por parte de los profesionales de la ingeniería, ya sea en ramas especializadas como automatización, mecánica o informática. Esta formación debe ir más allá de las definiciones tradicionales y brindar una comprensión funcional y contextualizada del papel de los robots en la sociedad actual.

La agricultura, considerada la actividad económica más antigua de la humanidad, continúa siendo esencial para nuestra subsistencia, ya que provee alimentos, forrajes, fibras y fuentes de energía. Según el Grupo Banco Mundial, ante el crecimiento demográfico estimado para 2050 —cuando la población mundial podría superar los 10 mil millones de personas— será necesario duplicar la producción agrícola para cubrir la creciente demanda de alimentos y bioenergía [4].

En este escenario, la robótica y la automatización surgen como herramientas clave para afrontar los retos del sector agrícola. Durante más de sesenta años, los robots han contribuido significativamente al incremento de la eficiencia y la disminución de costos en la industria. En los últimos treinta años, esta transformación tecnológica ha comenzado a reflejarse también en el ámbito agrícola, con la introducción de tecnologías como tractores y cosechadoras autónomas equipados con sistemas GPS y visión artificial, los cuales ya se encuentran disponibles en el mercado.

En años recientes, los productores agrícolas han empezado a incorporar soluciones robóticas para optimizar tareas específicas como la poda, el raleo y la cosecha, así como el corte de pasto, la aplicación de pesticidas y el control de malezas. Un caso destacado es el de la industria frutícola, donde se ha demostrado que los operarios que utilizan plataformas robóticas pueden duplicar la eficiencia en comparación con aquellos que realizan sus labores utilizando escaleras, figura 1 [5].

Fig. 1.

Robótica y Automatización Agrícola.

Nota. La figura muestra la robótica y automatización aplicada a la agricultura [5].

La incorporación de la robótica en el sector agrícola y de jardinería ha cobrado cada vez mayor relevancia, dado el incremento en la demanda de soluciones automatizadas que permitan optimizar recursos y mejorar la eficiencia en el cuidado y mantenimiento de espacios verdes y cultivos. La historia de la robótica ha evolucionado para abordar diversas necesidades, desde tareas industriales hasta aplicaciones específicas en agricultura, donde la implementación de robots ha demostrado ser fundamental para reducir la intervención humana y aumentar la precisión en tareas como la siembra, riego y poda [6].

El trabajo realizado por Lin Haibo, Dong Shuliang, Liu Zunmin y Yi Chuijie en 2015 [7], muestra que el robot puede ser una herramienta eficiente y confiable para mejorar la agricultura de precisión en la siembra de trigo, superando en rendimiento a los métodos tradicionales. Este estudio presenta un robot móvil de cuatro

ruedas diseñado específicamente para la siembra de trigo de precisión, con el objetivo de aumentar el rendimiento del cultivo figura 2.

Fig. 2.

Robot sembrador de trigo.

Nota. El robot móvil de cuatro ruedas para la siembra de trigo [7].

Digital Farmhand desarrolló una plataforma agrícola pequeña y móvil creada por el Centro Australiano de Robótica de Campo en la Universidad de Sydney. Esta herramienta está equipada con un teléfono inteligente, sensores y equipos de control que permiten realizar tareas como la siembra de precisión, la pulverización y la eliminación de malezas de manera eficiente. El objetivo principal es apoyar a los pequeños agricultores, especialmente en comunidades rurales de Australia, Indonesia y en el Pacífico, ayudándolos a incrementar su productividad, reducir costos y mejorar la seguridad alimentaria mediante el uso de tecnologías digitales y análisis de datos. La plataforma busca ser asequible, fácil de usar y adaptable a las necesidades de diversos contextos agrícolas, promoviendo la adopción de la agricultura digital entre pequeños productores, figura 3 [8].

Fig. 3.

Di-Wheel.

Nota. Experimento en una pequeña granja en Indonesia, usando un selfie stick para sujetar un teléfono inteligente con el que se toman fotos claras [8].

En 2016, Hassan, Ullah e Iqbal dieron a conocer el diseño de un robot autónomo creado específicamente para operar bajo las condiciones propias de un entorno agrícola. Este vehículo modular, fabricado localmente y con un enfoque de bajo costo, incorpora como elemento distintivo un innovador sistema de selección de semillas. A pesar de su simplicidad, este mecanismo se caracteriza por su alta eficiencia y un margen de error mínimo, lo que lo diferencia de otros modelos existentes. Las pruebas realizadas, que incluyeron el seguimiento de trayectorias mediante un minirrobot y la validación del rendimiento del selector de semillas, evidencian el gran potencial del sistema robótico desarrollado, figura 4 [9].

Fig. 4.

Sowing robot 1.

Nota. Imagen del prototipo robótico con selector de semillas [9].

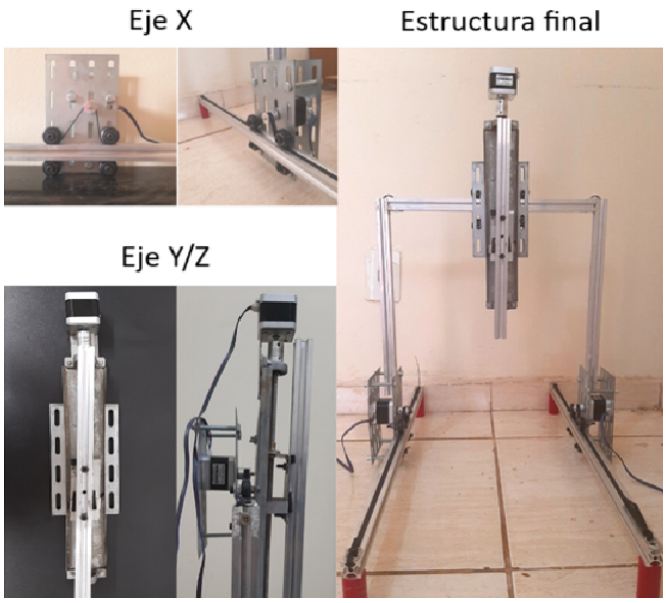
En este contexto, el robot cartesiano ha destacado debido a su simplicidad y utilidad en tareas lineales y repetitivas, siendo la base para múltiples aplicaciones en jardinería y agricultura automatizada. La tendencia actual se centra en el desarrollo de sistemas mecatrónicos que integren componentes mecánicos, electrónicos y de control para tareas de cuidado de cultivos, promoviendo prácticas sostenibles y el uso eficiente de los recursos disponibles.

Investigaciones recientes se han centrado en el desarrollo de robots cartesianos para aplicaciones agrícolas. Estos robots están diseñados para realizar diversas tareas, como la siembra de semillas, el riego y la monitorización ambiental. Los robots cartesianos pueden moverse a lo largo de tres ejes (X, Y, Z) para posicionar con precisión herramientas y sensores [10]. Están equipados con sensores para medir parámetros como la humedad, la temperatura y la humedad del suelo, así como cámaras para la inspección visual y la posible integración futura con sistemas de visión artificial [11]. Estos robots tienen como objetivo mejorar la eficiencia en los procesos agrícolas, especialmente en entornos controlados como los invernaderos. Los investigadores han explorado diferentes configuraciones, incluyendo plataformas móviles con manipuladores paralelos para la siembra de semillas [12]

y sistemas estacionarios para huertos frutales y viveros industriales [13]. El desarrollo de estos sistemas robóticos representa un avance hacia la integración de las tecnologías de la Industria 4.0 en la agricultura.

Fig. 5.

Robot cartesiano aplicado a la agricultura.



Nota. Estructura física final [10] .

El presente trabajo aborda la propuesta y diseño de un sistema autónomo mediante un robot jardinero basado en tecnología open source, capaz de realizar funciones básicas en el mantenimiento de un huerto, como riego, poda y monitorización. El desarrollo e implementación de este robot reduce la necesidad de intervención manual, contribuyendo así a una gestión más eficiente y sostenible de los espacios verdes urbanos. La incorporación de sensores de humedad, temperatura, proximidad, cámaras y sistemas de riego permite que el robot responda a las condiciones del entorno para optimizar su funcionamiento, favoreciendo prácticas sostenibles mediante la automatización y el uso racional de los recursos.

La relevancia de este estudio radica en su contribución a la innovación en el campo de la robótica agrícola, fomentando soluciones sostenibles y adaptables a diferentes tipos de jardines y cultivos. Además, mediante la utilización de tecnologías accesibles y de bajo costo, se busca facilitar la adopción y replicabilidad de este tipo de sistemas en contextos domésticos y comunitarios.

2. MÉTODO

El desarrollo del sistema autónomo de un robot jardinero ha involucrado una serie de fases metodológicas que comprenden desde la conceptualización y diseño de la estructura mecánica hasta la implementación de los sistemas electrónicos y de control, con el fin de garantizar un funcionamiento eficiente y preciso en tareas de jardinería. El proceso se dividió en varias etapas, comenzando por la definición de requerimientos y especificaciones, seguido por su modelado, construcción, integración y pruebas experimentales.

2.1. DISEÑO CONCEPTUAL Y MECÁNICO

La primera fase del método consistió en definir las necesidades y funcionalidades que el robot debía cumplir. Esto incluyó el análisis del entorno, los tipos de tareas a automatizar (siembra, riego, poda, monitoreo), las condiciones del espacio de trabajo, y la selección de materiales adecuados para garantizar durabilidad y funcionalidad. Se atendieron requisitos específicos como la precisión en desplazamiento, la capacidad de carga, la integración de sensores y actuadores, y la facilidad de control y monitoreo remoto.

Para esto, se realizó una revisión bibliográfica sobre robots agrícolas y sistemas mecatrónicos, identificando las mejores prácticas y tecnologías disponibles.

El robot jardinero autónomo posee varias características, funciones y tareas diseñadas para facilitar el cuidado y mantenimiento de los espacios verdes urbanos. Entre sus principales características se encuentran su estructura mecánica basada en un diseño de robot cartesiano, que le permite moverse con precisión en el espacio de trabajo, y su integración de componentes electrónicos y de control que aseguran una operación eficiente y automatizada.

Las funciones principales del robot incluyen:

- Siembra de plantas: utilizando accesorios, puede excavar y colocar semillas, garantizando una distribución uniforme en el jardín.
- Riego automatizado: mediante sensores de humedad, controla el sistema de riego para mantener las condiciones óptimas de las plantas.
- Podado y mantenimiento: puede recortar plantas y realizar tareas de limpieza para fomentar un crecimiento saludable.
- Monitoreo del estado de las plantas: emplea cámaras y sensores para supervisar el crecimiento.
- Adaptación a diferentes cultivos: gracias a su diseño modular, puede ser configurado para trabajar con distintos tipos de plantas y tareas específicas en función de las necesidades del usuario.

Las tareas que realizará contemplan:

- La preparación del terreno para nuevas siembras.
- La dispersión de semillas en espacios específicos.
- La irrigación en puntos estratégicos y en función de las mediciones de los sensores.
- La poda de plantas para promover un crecimiento saludable.

Estas capacidades permiten que el robot mejore la eficiencia del mantenimiento de jardines urbanos, promoviendo la sustentabilidad y reduciendo la intervención humana en tareas rutinarias.

Los robots con configuración cartesiana, debido a que utilizan tres ejes prismáticos, pueden adoptar distintas disposiciones según los requerimientos específicos de la tarea a realizar. En la fig. 6 (Ver anexo) se ilustran varias variantes de robots cartesianos utilizadas en entornos industriales, basadas en la guía técnica proporcionada por Schneider Electric [14].

Posicionador lineal

En esta disposición, el actuador lineal se ubica por encima o por debajo del área de operación, generalmente alineado a los ejes X o Z. Está pensado para el movimiento ágil de cargas en distancias reducidas.

Robot lineal

Este tipo de robot se sitúa a un costado de la zona de trabajo y ha sido optimizado para desplazar objetos a alta velocidad a lo largo de trayectos breves. Es común en procesos de ensamblaje o manipulación rápida.

Robot tipo portal

Este sistema se instala por encima del área operativa, lo que permite un mejor aprovechamiento del espacio en planta. Se emplea para el transporte de elementos sobre distancias amplias y con buena capacidad de carga.

Pórtico portal de pared

Diseñado especialmente para funcionar sobre superficies verticales, este tipo de robot pórtico permite automatizar tareas en planos perpendiculares al suelo, como en paredes o paneles verticales.

En el presente trabajo se usa la configuración tipo portal, ya que es ideal para un robot de jardinería porque permite cubrir de manera precisa y eficiente amplias áreas de cultivo sin interferir con las plantas, al estar suspendido sobre el área de trabajo. Esta disposición facilita el movimiento en los ejes X, Y y Z, lo que es fundamental para realizar tareas repetitivas como el riego, la poda o la recolección con alta precisión. Además, evita la compactación del suelo al no requerir desplazamiento a nivel del terreno y permite incorporar fácilmente distintos módulos o herramientas según las necesidades.

2.2. DISEÑO E INTEGRACIÓN DEL SISTEMA

El modelo del jardín autónomo corresponde al diseño final del prototipo, el cual fue desarrollado mediante el uso del software CAD SolidWorks. Gracias a esta herramienta, fue posible diseñar cada una de las piezas y llevar a cabo el ensamble completo del sistema. Las dimensiones del prototipo son las siguientes: 1.68 metros de ancho, 1.53 metros de altura y 1.5 metros de longitud, (Anexo, fig. 7).

La estructura del prototipo está conformada por cuatro soportes de aluminio de 1 pulgada de diámetro y 1.15 metros de longitud, ubicados en los extremos laterales. Los carriles responsables del desplazamiento en el eje Y están construidos con perfiles de 1 pulgada y tienen una longitud de 2.02 metros. En su interior se integran dos varillas de 3/8 de pulgada, que proporcionan soporte y estabilidad al movimiento en dicho eje. Por encima de estos carriles se encuentra el sistema encargado del desplazamiento en el eje X, el cual está fabricado con perfiles de ½ pulgada y tiene una longitud de 1.25 metros. Este carril incorpora un tornillo roscado tipo acmé de 3/8 de pulgada para garantizar la precisión del movimiento.

Para permitir la ejecución de las distintas tareas asignadas al robot, se diseñaron diversos efectores finales, los cuales pueden intercambiarse mediante un sistema de acoplamiento basado en electroimanes.

2.2.1. Efector fijo.

Como se observa en la figura 8 del anexo, este efector fue diseñado para alojar tres electroimanes, e incluye las respectivas entradas y salidas para el cableado. Además, presenta una perforación circular en la que se encuentra montado el efector destinado al riego.

2.2.2. Efector intercambiable para siembra.

Para permitir el intercambio de efectores mediante el uso de electroimanes, se emplean rondanas del mismo radio que estos, las cuales, debido a las propiedades de su material, pueden ser atraídas magnéticamente. Estas rondanas se insertan en las ranuras circulares ubicadas en la parte superior del efector. El diseño incluye una perforación circular que permite el paso libre de la boquilla de riego, en la parte inferior, se incorpora un compartimento de forma rectangular destinado a alojar una bomba de aire, la cual genera la succión necesaria para el manejo de las semillas, o en su caso para insertar el motor que al activarse realizará el corte mediante un güiro para podar, (ver anexo, fig. 9).

Las fig. 10 y 11 muestran el desarrollo del prototipo diseñado.

En las fig. 12 y 13 del anexo, se presenta el diagrama de los componentes eléctricos y electrónicos del sistema, junto con sus respectivas conexiones. Se eligió un microcontrolador Arduino Mega debido a su capacidad de manejo de múltiples entradas y salidas. El sistema cuenta con tres fuentes de corriente directa: una de 5V y dos de 12V, ya que algunos de los efectores finales requieren un voltaje superior para su funcionamiento.

Para el monitoreo del nivel de humedad en las plantas, se instalaron 16 sensores de humedad tipo YL-69, lo que permite al prototipo operar de forma autónoma, sin intervención humana. Los sensores de humedad YL-69 fueron calibrados experimentalmente, estableciendo un umbral de 40% de humedad en suelo como punto de riego. El mecanismo de intercambio de efectores utiliza

dos electroimanes de alta potencia, capaces de sostener firmemente los módulos intercambiables.

2.3. PROGRAMACIÓN Y CONTROL

Para el control y operación del robot jardinero autónomo, se desarrollaron dos componentes esenciales utilizando los lenguajes de programación Python y Arduino. Por un lado, se implementó una interfaz gráfica en Python que permite al usuario interactuar con el sistema de manera intuitiva, ofreciendo un menú principal donde se describen las funciones disponibles, como regar, sembrar o cortar. Además, incluye una representación visual del jardín (ver anexo, Fig. 14) en el lado derecho de la pantalla, lo que facilita la comprensión del estado y funcionamiento del sistema en tiempo real.

Por otro lado, en la plataforma de Arduino se programó el control lógico del hardware del jardín. Este código define las funciones que el sistema debe ejecutar y responde a los comandos enviados a través del puerto serial. También se estableció un punto de referencia o posición "home", que actúa como origen y destino de todas las operaciones del robot. El programa está estructurado en múltiples funciones específicas, cada una dedicada a realizar una tarea concreta como riego, siembra o corte.

La programación del código de Arduino, junto con la interfaz gráfica en Python, se desarrolló siguiendo la lógica representada en el diagrama de flujo mostrado en la fig. 15, el cual describe la secuencia de operaciones necesarias para llevar a cabo las actividades del jardín de forma autónoma y coordinada. Presenta el diagrama lógico que guía el funcionamiento del sistema automatizado del robot jardinero. Este diagrama describe la secuencia de decisiones y acciones que el sistema sigue desde su inicio hasta la finalización de cada tarea.

El proceso comienza en el estado de inicio, donde el robot verifica las condiciones del entorno a través de sus sensores. A continuación, el sistema evalúa qué tarea debe ejecutarse en función de los datos recibidos, como el nivel de humedad del suelo o la programación del usuario.

Una vez determinada la tarea (regar, plantar o podar), el robot selecciona el efector correspondiente mediante el sistema de electroimanes, y se dirige a la posición específica dentro del área de trabajo. Allí, ejecuta la acción indicada y posteriormente retorna al estado de inicio para verificar si hay más tareas pendientes.

Este enfoque basado en decisiones secuenciales garantiza una operación ordenada, autónoma y eficiente, minimizando la intervención humana y optimizando el uso de los recursos del jardín.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESULTADOS

Para validar el correcto funcionamiento del sistema, se llevaron a cabo diversas pruebas en condiciones reales del entorno de trabajo, simulando tareas como la siembra en hoyos, riego y monitorización de plantas.

Se realizaron mediciones de la precisión en desplazamiento, eficiencia en tareas específicas, tiempo de respuesta a las variaciones en los sensores y estabilidad del sistema en diferentes condiciones climáticas. La tabla 1 resume los valores esperados y obtenidos durante las pruebas:

TABLA I

Comparativa de desempeño del Sistema

	Esperado	Obtenido
Precisión	±5 mm	±3 mm
Tiempo de respuesta	<3 s	2.3 s

El uso del sensor YL-69 para la medición de la humedad del suelo permitió un control más preciso del riego, ajustándolo a las necesidades reales de las plantas. Esta regulación contribuyó a prevenir el riego excesivo, favoreciendo el ahorro de agua y optimizando el desarrollo del cultivo de cilantro.

El prototipo se evaluó en un huerto experimental con plantas de cilantro, seleccionadas por su ciclo corto y facilidad de observación. La figura 16 muestra el crecimiento de cultivos en el huerto controlado, evidenciando la efectividad del sistema en la gestión del cultivo bajo las acciones automatizadas.

El robot cartesiano implementado mostró una capacidad para navegar de manera precisa y autónoma dentro del huerto, cumpliendo con los objetivos planteados en la fase de diseño.

Durante las pruebas de campo, el robot llevó a cabo tareas específicas de cuidado de las plantas, tales como la siembra, riego y monitoreo. Los datos recopilados a través de los sensores de humedad, temperatura y proximidad confirmaron la correcta recepción y procesamiento de la información, permitiendo que el robot ajustara sus acciones en tiempo real para optimizar el crecimiento de los cultivos.

Como resultado, se observó que los cultivos alcanzaron un desarrollo adecuado, evidenciado mediante imágenes. La interfaz visual y la lectura de sensores facilitaron la monitorización y control del sistema en tiempo real, evidenciando la funcionalidad y usabilidad del prototipo.

El video de demostración disponible en [https://youtu.be/87_9QgjO1e4] complementa la evaluación visual del rendimiento del robot, permitiendo una comprensión clara del funcionamiento general del sistema.

3.2. DISCUSIÓN

El desarrollo del robot jardinero autónomo basado en tecnología open source demuestra una aplicación de la automatización de tareas horticulturales urbanas. Los resultados obtenidos durante las pruebas, que evidenciaron una desplazamiento correcto y realización de tareas

como siembra, riego y monitoreo, confirman la viabilidad técnica del sistema para operar de forma autónoma en un huerto controlado. La incorporación de sensores permitió al robot ajustar sus acciones en tiempo real, lo que favorece no solo la eficiencia operativa y aspectos clave en la sostenibilidad de los entornos urbanos.

Desde una interpretación pragmática, el sistema aporta beneficios al reducir la intervención humana en actividades rutinarias y laboriosas, disminuyendo la carga de trabajo en el cuidado de las plantas. Esto es especialmente relevante en contextos urbanos donde el tiempo y la mano de obra especializada pueden ser limitados. Por tanto, el robot puede contribuir a facilitar el acceso a técnicas de cultivo más eficientes y sostenibles, incluso en espacios reducidos y complejos.

El prototipo presenta ciertas limitaciones técnicas y de escalabilidad que deben considerarse en futuras versiones. Una de las principales se relaciona con la autonomía energética. El sistema depende actualmente de una fuente de alimentación externa, lo que restringe su movilidad y su uso en áreas donde no existe un suministro eléctrico cercano. La incorporación de fuentes de energía renovable, como paneles solares o baterías de alta eficiencia, sería esencial para dotar al robot de una verdadera autonomía operativa y reducir su huella ambiental.

Asi mismo, la escalabilidad del diseño hacia áreas de cultivo más amplias implica desafíos. El sistema cartesiano, aunque eficiente en superficies reducidas, podría requerir una reconfiguración estructural o modular para operar en extensiones mayores sin perder precisión ni aumentar excesivamente el consumo energético. La implementación de módulos autónomos cooperativos capaces de comunicarse entre sí y distribuir tareas podría ser una estrategia viable para ampliar su alcance funcional.

La tecnología open source utilizada ofrece una plataforma flexible para mejorar y adaptar el sistema, pero su éxito dependerá en gran medida de la accesibilidad técnica para usuarios finales y de la integración con otros sistemas inteligentes urbanos. Además, la capacidad del robot para manejar diferentes tipos de cultivos y adaptarse a condiciones cambiantes del entorno podría establecer un camino hacia soluciones más personalizadas y escalables en agricultura urbana.

La Cuarta Revolución Industrial, impulsada por IA, robótica y Big Data, está transformando los sectores económicos en México, generando tanto oportunidades como desafíos. La automatización amenaza empleos rutinarios y de baja calificación en manufactura, servicios, finanzas y comercio electrónico, pero también impulsa avances y nuevos empleos en salud, educación, agricultura y finanzas. Los principales retos incluyen la vulnerabilidad laboral, la polarización salarial y la necesidad de una mejor preparación del capital humano, así como la adaptación educativa para enfrentar los cambios tecnológicos [15], [16].

Mientras la reducción de intervención humana puede mejorar la eficiencia, también plantea preguntas sobre la reconversión de habilidades laborales y la importancia de mantener ciertos niveles de interacción humana para la supervisión y el cuidado cualitativo de los espacios verdes. En términos ambientales, la automatización puede facilitar prácticas más sostenibles, pero es necesario validar cómo se traducen estas mejoras en la biodiversidad urbana y la resiliencia ecológica.

En síntesis, el robot jardinero representa un aporte a la robótica agrícola urbana, incorporando tecnologías accesibles y fomentando una gestión sostenible. Su evolución debe equilibrar la precisión tecnológica con las necesidades sociales y ambientales, asegurando que la automatización sea una herramienta que potencie, y no reemplace, la interacción humana en la conservación de los ecosistemas urbanos.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema mecatrónico para el jardín autónomo demostró ser una solución eficaz y eficiente para el cuidado y mantenimiento automatizado de cultivos en un entorno hortícola. A través del diseño e implementación de un robot cartesiano equipado con sensores de humedad, temperatura y proximidad, se lograron tareas específicas, como siembra y riego con autonomía.

La correcta incorporación de componentes eléctricos y electrónicos, así como la eficiente integración con la interfaz de control, permitieron una supervisión en tiempo real y un monitoreo efectivo de las plantas, logrando un crecimiento adecuado de cultivos como cilantro, perejil y cebolla.

Este proyecto contribuye a la aplicación práctica de tecnologías de robótica y automatización en la agricultura urbana, promoviendo el desarrollo sustentable y optimizando el uso de espacios verdes en viviendas y edificaciones, en línea con la tendencia global hacia la agricultura inteligente. Además, la implementación de herramientas open source abre las puertas a futuras mejoras y adaptaciones del sistema.

En suma, el sistema desarrollado aporta a la promoción de técnicas sostenibles en la gestión de huertos urbanos.

REFERENCIAS

[1] J. Mercader, «El impacto de la robótica y el futuro del trabajo», *Revista de la Facultad de Derecho de México*, vol. Tomo LXVII, n.º 269, 2017, [En línea]. Disponible en: www.revistas.unam.mx › index.php › rfdm › article › download

[2] A. J. Pérez Vidal, Á. Castro-González, F. Alonso, J. C. Castillo, y M. Á. Salichs, «Evolución de la robótica social y nuevas tendencias», *XXXVIII Jornadas de Automática*, pp. 836-843, 2017, doi: https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497749.0836.

[3] B. I. Valverde Castro, «La importancia de la Robótica como eje en el desarrollo de la sociedad», *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, vol. 5, n.º 8, pp. 1368-1377, 2020.

[4] GRUPO BANCO MUNDIAL, «Agricultura y alimentos», World Bank. [En línea]. Disponible en: https://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/overview

[5] Agricultural Robotics & Automation Society - IEEE, «Robótica y automatización agrícola». [En línea]. Disponible en: https://www.ieee-ras.org/agricultural-robotics-automation

[6] L. F. P. Oliveira, A. P. Moreira, y M. F. Silva, «Advances in Agriculture Robotics: A State-of-the-Art Review and Challenges Ahead», *Robotics*, vol. 10, n.º 2, p. 52, mar. 2021, doi: 10.3390/robotics10020052.

[7] H. Lin, S. Dong, Z. Liu, y C. Yi, «Study and Experiment on a Wheat Precision Seeding Robot - Haibo - 2015 - Journal of Robotics - Wiley Online Library», *Jornal of Robotics*, vol. 2015, n.º 1, p. 696301, 24 de noviembre de 2015.

[8] S. Sukkarieh, «Mobile on-farm digital technology for smallholder farmers», presentado en Crawford Fund 2017: Transforming Lives and Livelihoods: The Digital Revolution in Agriculture, 7-8 August 2017, AgEcon, ago. 2017. doi: https://doi.org/10.22004/ag.econ.266635.

[9] M. U. Hassan, M. Ullah, y J. Iqbal, «Towards autonomy in agriculture: Design and prototyping of a robotic vehicle with seed selector», presentado en 2016 2nd International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI), Rawalpindi, Pakistan, nov. 2016, pp. 37-44. doi: 10.1109/ICRAI.2016.7791225.

[10] I. P. Ferreira Silva y K. Resende Mendoça, «PROTÓTIPO DE UM ROBÔ CARTESIANO PARA A APLICAÇÃO EM AGRICULTURA», Actas del XXIV Congreso Brasileiro de Automática. [En línea]. Disponible en: https://sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/3190/2718

[11] H. M. Torres, I. A. Cordero, y F. D. Salgado, «Implementation of a Cartesian Robot XYZ for the Control of Agricultural Parameters in Seed Germination», en *2022 IEEE ANDESCON*, Barranquilla, Colombia, nov. 2022, pp. 1-6. doi: 10.1109/ANDESCON56260.2022.9989747.

[12] J. Cornejo, R. Palomares, M. Hernández, D. Magallanes, y S. Gutierrez, «Mechatronics Design and Kinematic Simulation of a Tripteron Cartesian-Parallel Agricultural Robot Mounted on 4-Wheeled Mobile Platform to Perform Seed Sowing Activity», presentado en 2022 First International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT), Trichy, India, feb. 2022, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICEEICT53079.2022.9768422.

[13] C. J. Choque Moscoso, E. M. Fiestas Sorogastúa, y R. S. Prado Gardini, «Efficient Implementation of a Cartesian Farmbot Robot for Agricultural Applications in the Region La Libertad-Peru», presentado en 2018 IEEE ANDESCON, Santiago de Cali, Colombia, 2018, pp. 1-6. doi: doi:10.1109/ANDESCON.2018.8564607.

[14] Schneider Electric Company, «Lexium Cartesian Robots», World Bank. [En línea]. Disponible en: https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=DIA7ED2210101EN&p_enDocType=Catalog&p_File_Name=Catalog+Lexium+Cartesian+Robots_November+2021.pdf

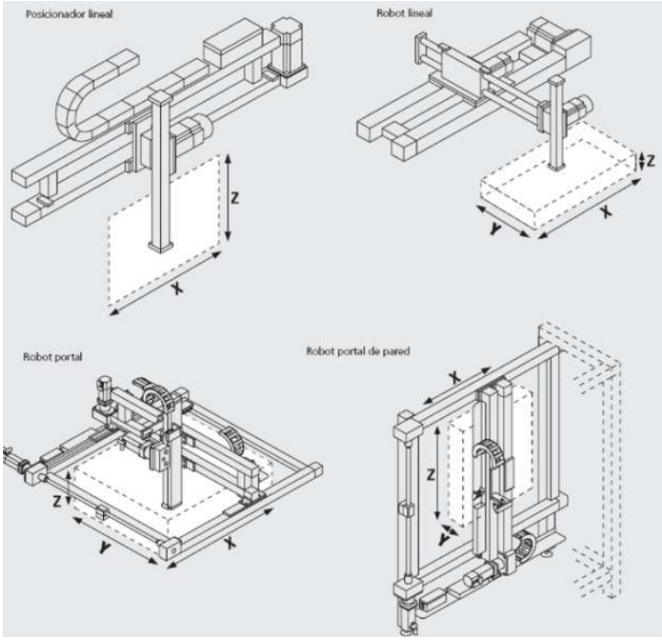
[15] M. V. Pilco Núñez y J. Achachi, «Impacto de la Inteligencia Artificial en las Actividades Humanas: Un análisis de las consecuencias | CONECTIVIDAD», vol. 6, n.º 1, pp. 256-270, 2025.

[16] A. Ultreras-Rodríguez, M. T. de J. De La Paz-Rosales, J. D. Santana-Alaniz, y A. G. Ramírez-Ortega, «Inteligencia artificial y su impacto en la automatización del trabajo en México | Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía», *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, vol. 10, n.º 19, pp. 4-25, 2025, doi: https://doi.org/10.35381/r.k.v10i19.4364.

ANEXOS

Fig. 6.

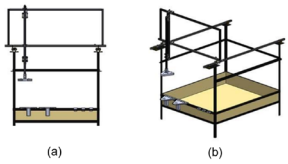
Robots cartesianos.



Nota. Descripción de las configuraciones cartesianas [14].

Fig. 7.

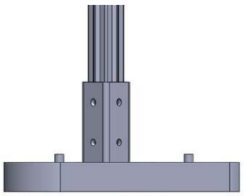
(a) Vista frontal, (b) Vista isométrica



Nota. Diseño de la estructura.

Fig. 8.

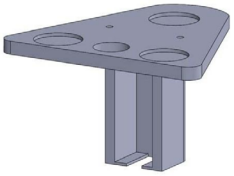
Efector fijo



Nota. Efector fijado a perfil de aluminio 20x20.

Fig. 9.

Efector intercambiable.



Nota. Vista isométrica del efector intercambiable.

Fig. 10.

Efector ensamblado con el efector de sembrado.

Nota. Efector fijo realizando el intercambio para la función de sembrado.

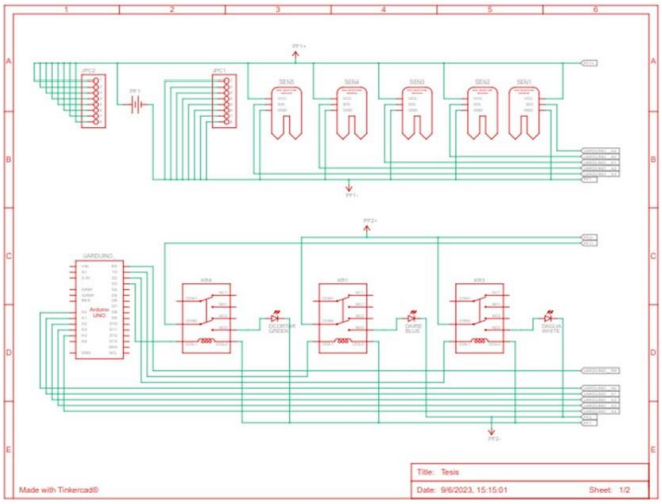
Fig. 11.

Estructura del prototipo

Nota. Ensamble final de la estructura.

Fig. 12.

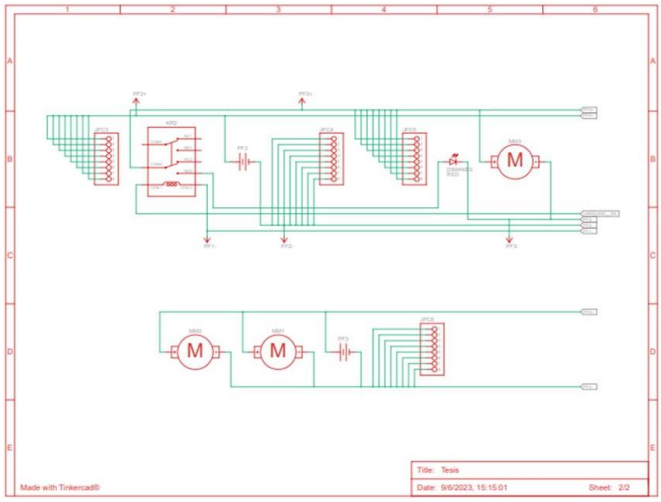
Circuito eléctrico.



Nota. Componentes electrónicos y sensores.

Fig. 13.

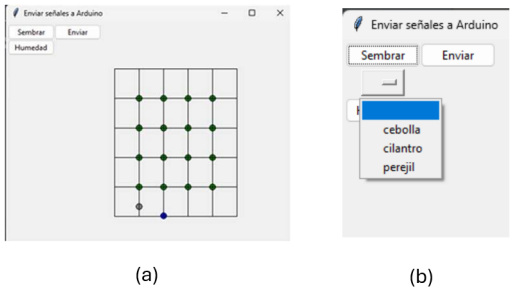
Diagrama eléctrico.



Nota. Componentes electrónicos y actuadores.

Fig. 14.

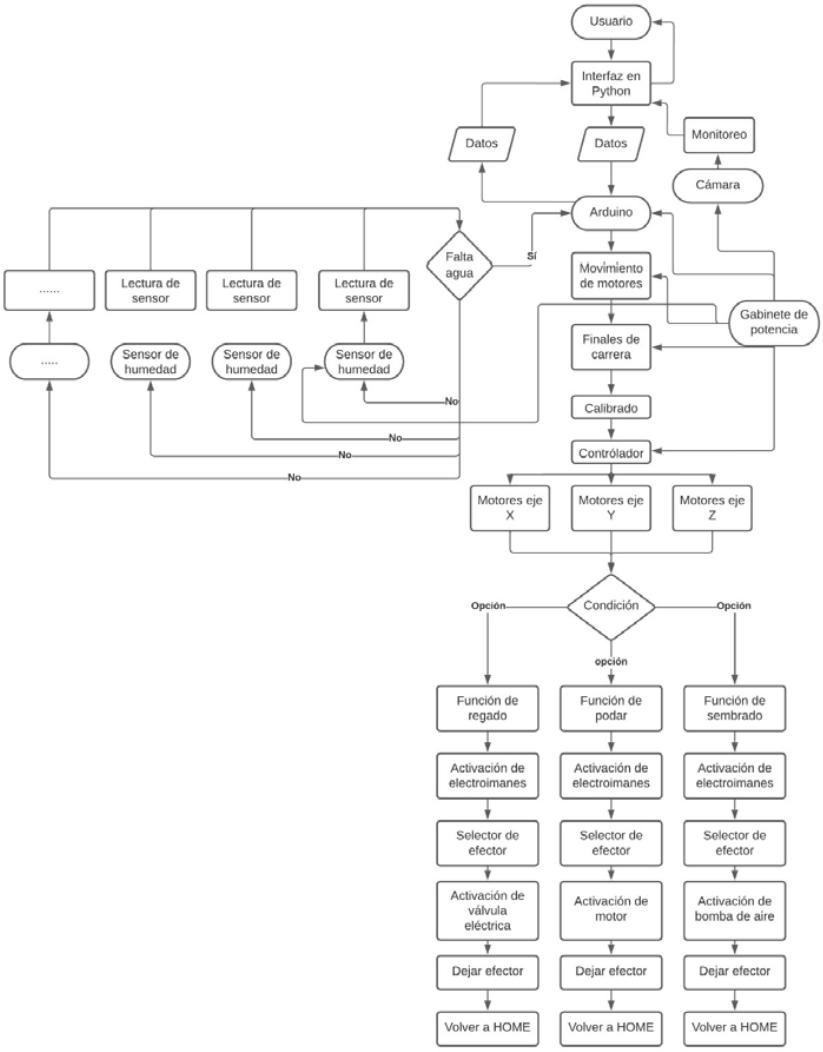
Interfaz (a) para monitoreo, (b) para envío de señales.



Nota. Interfaz para sembrar o monitorear la humedad, así como la indicación del tipo de planta.

Fig. 15.

Diagrama de flujo del programa.



Nota. Lógica de programación considerando las funciones del robot jardinero.

Fig. 16.

(a) Prototipo (b) Resultados de cultivos.

(a) (b)

Nota. En las imágenes se muestra el prototipo con cultivos en crecimiento.

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

INGENIO
202, VOL 9(1), JULIO - DICIEMBRE, PP. 015-025

REVISTA INGENIO

Clasificación de Cáncer de Mama con Implementación de Técnicas de Análisis de Componente Principal

Classification Of Breast Cancer with Implementation of Principal Component Analysis Techniques

José Alberto León Alarcón | Universidad Técnica de Manabí, UTM
Roly Steeven Cedeño Menéndez | Universidad Técnica de Manabí, UTM

Recibido: 8/5/2025
Recibido tras revisión: 31/7/2025
Aceptado: 12/9/2025
Publicado: 16/1/2026

PALABRAS CLAVE
Procesamiento de datos, Cáncer, Inteligencia artificial, Aplicación informática.

RESUMEN
El cáncer de mama es una de las principales causas de mortalidad en mujeres a nivel mundial, lo que subraya la importancia de implementar herramientas de diagnóstico precisas y eficientes. Este estudio evaluó el desempeño de varios algoritmos de aprendizaje automático para la clasificación de tumores mamarios utilizando el Wisconsin Breast Cancer Dataset. Se aplicó Análisis de Componentes Principales (PCA) para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos, mejorando la eficiencia computacional y manteniendo la información crítica para la clasificación.

Los modelos evaluados incluyeron Regresión Logística, Máquinas de Soporte Vectorial (SVM), Redes Neuronales, alcanzando valores máximos de AUC-ROC de 0.96, 0.95 y 0.99, respectivamente. Los resultados se compararon con estudios previos, evidenciando la solidez y aplicabilidad del enfoque propuesto.

Aunque los hallazgos son prometedores, el estudio reconoce limitaciones, como el uso de un único dataset, y sugiere integrar características clínicas adicionales en investigaciones futuras. Este trabajo demuestra la capacidad del aprendizaje automático para mejorar el diagnóstico temprano del cáncer de mama, con potencial para aplicaciones en entornos clínicos.

KEY WORDS
Data processing, Cancer, Artificial intelligence, Computer applications.

ABSTRACT
Breast cancer is one of the leading causes of mortality in women worldwide, underscoring the importance of implementing accurate and efficient diagnostic tools. This study evaluated the performance of several machine learning algorithms for breast tumor classification using the Wisconsin Breast Cancer Dataset. Principal Component Analysis (PCA) was applied to reduce the dimensionality of the dataset, improving computational efficiency while maintaining critical information for classification.

The models evaluated included Logistic Regression, Support Vector Machines (SVM), Neural Networks, reaching maximum AUC-ROC values of 0.96, 0.95 and 0.99, respectively. The results were compared with previous studies, evidence of the robustness and applicability of the proposed approach.

Although the findings are promising, the study acknowledges limitations, such as the use of a single dataset, and suggests integrating additional clinical features in future research. This work demonstrates the ability of machine learning to improve early diagnosis of breast cancer, with potential for applications in clinical settings.

1. INTRODUCCIÓN

El cáncer de mama constituye uno de los principales problemas de salud a nivel mundial debido a su alta incidencia y mortalidad. Si bien los avances médicos han permitido mejorar los índices de supervivencia, el diagnóstico temprano continúa siendo un desafío. En particular, los métodos tradicionales de evaluación clínica pueden presentar limitaciones asociadas a la subjetividad del observador y a la variabilidad en la interpretación de resultados.

En este contexto, se ha incrementado el interés en el desarrollo de herramientas computacionales basadas en el análisis de datos biomédicos, que permitan apoyar de manera objetiva la clasificación de tumores mamarios. Estas herramientas no buscan reemplazar la labor clínica, sino complementar la toma de decisiones mediante el uso de

https://doi.org/10.29166/ingenio.v9i1.8194
2025 Universidad Central del Ecuador
CC BY-NC 4.0 —Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional
pISSN 2588-0829
eISSN 2697-3243
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

algoritmos de aprendizaje automático capaces de procesar grandes volúmenes de datos y detectar patrones relevantes.

En la investigación [1] expresa que este tipo de cáncer es uno de los más frecuentemente diagnosticados, siendo este la quinta causa de muerte relacionada con el cáncer, con cerca de 2 millones de casos nuevos de manera anual en todo el mundo.

Aunque la tasa de mortalidad por cáncer de mama ha disminuido a lo largo de los últimos 50 años, debido a la mejoras diagnósticas y terapéuticas por parte del personal de salud, este tipo de cáncer sigue siendo un problema de salud pública mundial [2].

A medida que la tecnología avanza, se han desarrollado diversas herramientas estadísticas y de aprendizaje automático que facilitan el diagnóstico y la clasificación de esta enfermedad. Uno de estos enfoques es el uso de algoritmos de aprendizaje automático que permite la clasificación de datos sobre el paciente que podría padecer o no un cáncer mamario. Los algoritmos de clasificación, que buscan distinguir entre tumores benignos y malignos, son una pieza fundamental de este enfoque. Sin embargo, el rendimiento de estos algoritmos depende en gran medida de la calidad de los datos disponibles y de las técnicas de preprocesamiento utilizadas para extraer características relevantes.

La reducción de dimensionalidad es un paso crítico en problemas de clasificación con conjuntos de datos de alta dimensión, como los relacionados con imágenes médicas o datos genómicos. El Análisis de Componentes Principales (PCA) es una técnica consolidada para reducir la dimensionalidad de conjuntos de datos biomédicos de alta complejidad. Esta técnica se ha consolidado como una herramienta eficaz para la reducción de dimensionalidad en datos de alta complejidad. Al transformar variables originales en componentes no correlacionados que explican la mayor proporción de la varianza, PCA no solo elimina ruido y redundancia, sino que mejora la eficiencia y robustez de los modelos supervisados de clasificación. En aplicaciones específicas al cáncer de mama, esta reducción se traduce en modelos más rápidos, generalizables y clínicamente interpretables, al facilitar la diferenciación entre tumores benignos y malignos. Para lograrlo, convierte las variables que podrían estar correlacionadas en un grupo más reducido de características, conocidas como componentes principales [3]. La selección adecuada del número de componentes principales es fundamental para evitar tanto la pérdida de información valiosa como la inclusión de ruido, lo cual puede afectar el rendimiento del modelo de clasificación.

Algunos autores han desarrollado distintos modelos de predicción del protocolo de tratamiento de cáncer de mama. En el trabajo [4] se explora la utilización del aprendizaje automático haciendo uso de datos recolectados en el Hospital Mohammed VI de Marruecos, la cual contiene información de pacientes con dos objetivos (protocolo y ciclo de tratamiento). En este estudio se utilizaron modelos de clasificación como Gradient Boosting Classifier y Random Forest. Adicionalmente, los autores realizaron un análisis de importancia de características lo cual ayudaba a resaltar la importancia de las variables y mostrar la influencia positiva de algunas variables en los modelos.

Otros autores recopilaron información de la base de datos Breast Cancer Wisconsin Dataset, donde llevaron a cabo el procesamiento de datos respectivos, como el tratamiento de datos faltantes, la normalización y la división del conjunto de datos para los conjuntos de datos de entrenamiento y prueba en un porcentaje del 80% de los datos para el entrenamiento y un 20% de los datos para la prueba. En este estudio, se aplicaron dos enfoques diferentes: un enfoque se utilizó para la supervivencia del cáncer de mama, tales como Survival Random Forest y Cox; el enfoque adicional utilizado fue para la clasificación en donde se utilizaron algoritmos de clasificación como Naive Bayes y Random Forest [5].

En otra publicación se han utilizados técnicas como Naive Bayes, Regresión logística, máquina de soporte vectorial, K-Nearest Neighbor y árbol de decisión (DT), y técnicas de conjunto: Random forest (RF), Adaboost, XGBoost en el conjunto de datos de cáncer de mama y evaluados mediante el uso de diferentes medidas de rendimiento. En este trabajo la selección de características es una de las estrategias para la extracción de las características más significativas y útiles de un conjunto de datos esto ayuda al entrenamiento y la precisión del modelo [6].

Estudios previos que emplearon el Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Dataset han reportado altos niveles de precisión en la clasificación de tumores. Por ejemplo, Agarap alcanzó una exactitud de ~99.0 % usando MLP con una división 70 %–30 % [7]. Entezari identificó al SVM como el clasificador más eficaz según sus métricas [8]. H. Benbrahim et al. evaluaron 11 modelos y encontraron que redes neuronales lograban hasta 96.5 % de exactitud [9]. Otros estudios mediante SVM y ANN han obtenido cerca del 97 % en exactitud [10]. Finalmente, combinaciones con preprocesamiento y selección rigurosa de variables llevaron a precisiones de hasta 99.1 % [11]various computer-aided diagnosis (CAD. Esta línea de resultados establece un benchmark claro frente al cual situamos y evaluamos nuestro enfoque con PCA + clasificadores supervisados.

El objetivo de este estudio es implementar y evaluar técnicas de aprendizaje automático, integradas con Análisis de Componentes Principales (PCA), para mejorar la eficiencia y precisión en la detección de cáncer de mama, contribuyendo a metodologías más ligeras y fácilmente integrables en entornos clínicos asistidos por computadora. Con este enfoque, se busca mejorar la precisión diagnóstica y apoyar la toma de decisiones tempranas en entornos clínicos. La elección del número óptimo de componentes principales se realizó mediante el método de codo, una técnica visual y analítica que

permite identificar el punto de inflexión donde la inclusión de más componentes no aporta mejoras significativas en la varianza explicada. Posteriormente, se evaluó el rendimiento en diferentes algoritmos de clasificación tales como la Regresión Logística, *Máquinas de Vectores de Soporte* (SVM) y Redes Neuronales en un conjunto de datos de pacientes con sospecha de cáncer de mama. Estos modelos se centrarán en identificar patrones y características específicas como el radio, la textura, el perímetro, el área del bulto mamario y entre otras características que permitan discriminar entre casos malignos y benignos, apoyando así al proceso de toma de decisiones médicas. A través del uso de estos algoritmos, se pretende optimizar el análisis de los datos disponibles, maximizando la precisión en la predicción y minimizando los errores en el diagnóstico. La investigación evaluará la eficacia de distintos enfoques de clasificación en términos de sensibilidad, especificidad y precisión, con el objetivo de aportar soluciones que puedan ser potencialmente aplicadas en entornos clínicos.

El aporte distintivo de este trabajo radica en evaluar de manera sistemática el impacto del PCA en el desempeño de tres algoritmos clásicos de clasificación (Regresión Logística, SVM y Redes Neuronales), utilizando métricas clínicas clave como sensibilidad, especificidad y AUC-ROC. A diferencia de estudios previos que aplican PCA solo como preprocesamiento, aquí se analiza cómo esta técnica contribuye al equilibrio entre reducción de dimensionalidad y rendimiento predictivo, aportando evidencia sobre su aplicabilidad en entornos clínicos con recursos limitados.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

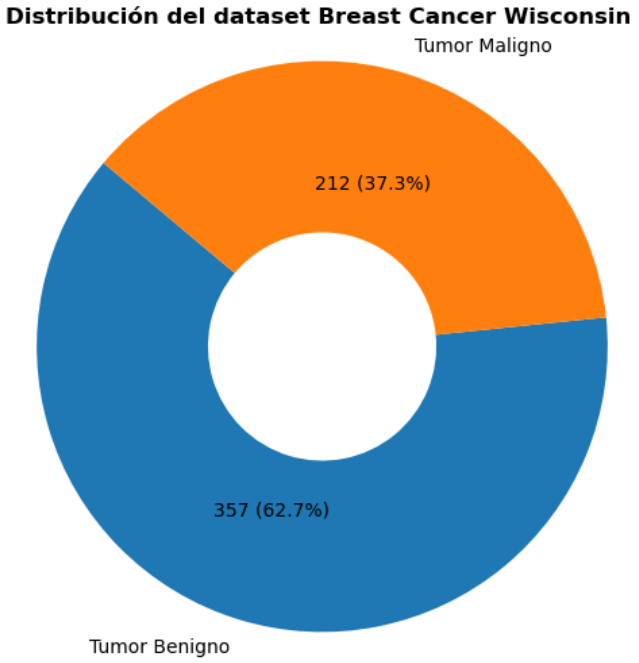
Este estudio se desarrolló en un entorno computacional utilizando datos secundarios de acceso público. El área de estudio corresponde a la clasificación automatizada de cáncer de mama a partir de un conjunto de datos biomédicos previamente recolectados y validados, proveniente del UCI Machine Learning Repository, específicamente el Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Dataset [12].

El diseño corresponde a un estudio observacional, retrospectivo y de carácter experimental-computacional, dado que se basa en registros existentes y no implicó interacción directa con pacientes.

Los hechos observacionales incluyen 569 muestras de tejido mamario (357 benignas y 212 malignas) caracterizadas mediante 30 atributos cuantitativos derivados de imágenes obtenidas por aspiración con aguja fina. Las variables comprendían de mediciones morfométricas como radio, textura, perímetro, área, suavidad, compacidad, concavidad, puntos cóncavos, simetría y dimensión fractal. La distribución de las instancias entre tumores benignos y malignos se muestra en la Fig. 1, donde se observa gráficamente la proporción de casos en cada categoría.

Las etiquetas binarias ("M" para maligno y "B" para benigno) se consideraron como la variable objetivo en las tareas de clasificación supervisada.

Fig. 1.
Distribución de instancias del Dataset



Nota. La figura muestra la distribución de clases en el conjunto de datos Breast Cancer Wisconsin [12].

Para el análisis, se procesaron los datos, se verificó que no hubiera datos ausentes. En este caso, el conjunto de datos estaba completo, por lo que no fue necesario imputar valores. Sin embargo, las etiquetas originales correspondientes a los tipos de tumores fueron transformadas a valores numéricos binarios para facilitar su manejo en los modelos de aprendizaje automático. Específicamente, la etiqueta **M** (maligno) fue codificada como **1**, mientras que la etiqueta **B** (benigno) fue codificada como **0**. Esta transformación permitió que los algoritmos de clasificación procesen las etiquetas como valores numéricos, simplificando el cálculo de métricas y optimizando el rendimiento computacional en las etapas de entrenamiento y evaluación. A partir de aquí dado que las características originales tenían magnitudes variables, se realizó un proceso de estandarización de las características para garantizar una correcta interpretación de los algoritmos de clasificación.

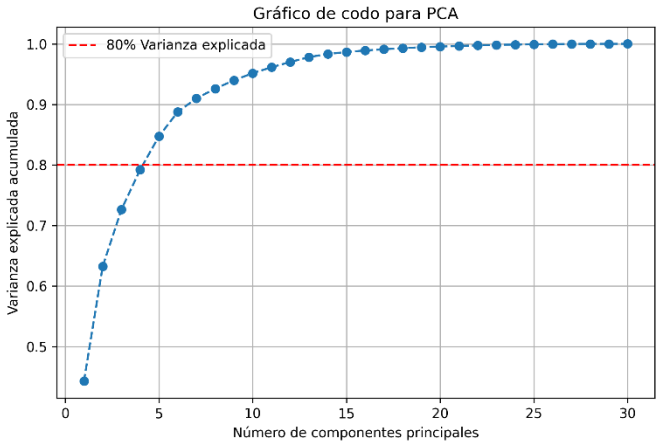
Dicho conjunto de datos fue dividido en un 80% conjunto de datos de validación y el 20% en un conjunto de datos de prueba o de testeo. Este procedimiento se llevó a cabo antes de aplicar cualquier tipo de transformación o preprocesamiento, con el fin de evitar el riesgo de fuga de datos y asegurar que los modelos a implementar aprendan únicamente a partir de la información disponible en el conjunto de entrenamiento, sin verse influenciado por datos que estarán en la evaluación final. Así, se preserva

la integridad de la validación y se evita que el modelo obtenga una ventaja indebida en la fase de pruebas.

Con el fin de reducir la dimensionalidad y mejorar la eficiencia de los modelos, se aplicó el Análisis de Componentes Principales (PCA). Esta técnica permitió reducir las 30 características iniciales a un número de 5 componentes principales, valor el cual fue escogido por medio del *método del codo* capturando cerca del 83% de la varianza explicada, preservando al máximo la variabilidad de los datos. Este punto representa un equilibrio adecuado, ya que permite reducir la dimensionalidad original de 30 a 5 componentes sin comprometer de forma significativa la información contenida en los datos (**Fig. 2**).

Fig. 2.

Gráfica del método del Codo



Nota. La figura muestra la gráfica del codo donde se observa el 80% de la varianza explicada para seleccionar el número de componentes principales.

Posteriormente, se implementaron varios algoritmos de aprendizaje automático, incluyendo Regresión Logística, *Máquinas de Vectores de Soporte* (SVM) y Redes Neuronales seleccionados por su efectividad en problemas de clasificación y su capacidad para identificar patrones complejos en datos multidimensionales.

Desde un enfoque metodológico, el aporte de este trabajo consiste en integrar PCA con tres algoritmos de clasificación bajo un esquema de validación cruzada, permitiendo comparar de forma objetiva la eficiencia computacional y el rendimiento predictivo en un problema biomédico crítico.

2.1. REGRESIÓN LOGÍSTICA

La regresión logística es un algoritmo de aprendizaje supervisado ampliamente utilizado para problemas de clasificación binaria, donde la variable dependiente toma valores discretos (0 o 1). El modelo de regresión logística estima la probabilidad de que se produzca un suceso frente a la probabilidad de que no se produzca [13]. En este caso, se ha configurado el modelo con parámetros específicos para mejorar su desempeño en conjuntos de datos con posible desbalance de clases. Estos parámetros son explicados en la Tabla 1.

TABLA I.

Parámetros de regresión logística

Parámetro	Valor	
Nivel de regularización (C)	0.01	Establece una regularización alta, lo que ayuda a prevenir el sobreajuste.
Pesos de clases (class_weight)	Balanced	Ajusta automáticamente los pesos de cada clase en función de su frecuencia en los datos de entrenamiento
Semilla (random_state)	42	Establece una semilla aleatoria para garantizar la reproducibilidad de los resultados

La implementación de la regresión logística con los parámetros ajustados garantiza una clasificación robusta en presencia de datos desbalanceados, mejora la generalización gracias a la regularización, y permite reproducir los experimentos. Su correcto ajuste y evaluación en validación cruzada son esenciales para maximizar su desempeño en aplicaciones prácticas.

2.2. MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL

Una máquina de vectores soporte (SVM) es un modelo de aprendizaje automático supervisado utilizado para la clasificación de datos. Su objetivo es identificar un hiperplano óptimo que separe las distintas clases en un espacio N-dimensional, maximizando la distancia entre ellas para mejorar la precisión del modelo [14]. En esta configuración, el modelo ha sido ajustado con parámetros específicos para mejorar su estabilidad y capacidad de generalización.

La Máquina de Soporte Vectorial con C=0.01 y kernel="linear" garantiza un modelo interpretable, con un balance adecuado entre regularización y precisión. Además, la activación de probabilidades facilita la interpretación de los resultados.

2.3. REDES NEURONALES

A diferencia de los modelos de Regresión Logística y Máquinas de Soporte Vectorial, la Red Neuronal tuvo una configuración específica. Dicha Red Neuronal, fue creada mediante la clase Sequential [15] del Framework Keras de Python.

La red neuronal implementada sigue una estructura multicapa con activaciones no lineales. Se compone de tres

TABLA II

Parámetros de máquinas de soporte vectorial

Parámetro	Valor	
Nivel de regularización (C)	0.01	Establece una regularización alta, lo que ayuda a prevenir el sobreajuste.
Núcleo (kernel)	Linear	Un kernel **lineal** busca una separación directa sin introducir dimensiones adicionales.
Estimación de probabilidades (probability)	True	Habilita la estimación de probabilidades, permitiendo calcular la confianza de una clasificación. Esto es útil para interpretar los resultados y realizar análisis posteriores.

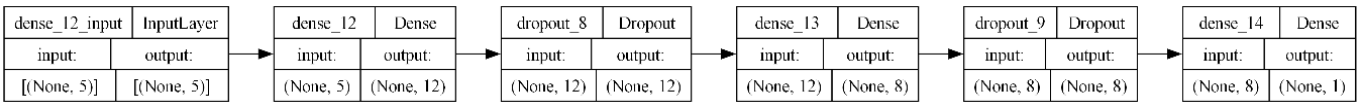
TABLA III.

Capas de la red neuronal

Capa	Parámetro	Valor	
Dense [16]	Unidades	12	Neuronas de la capa.
	Input shape	5	Características principales de entrada resultantes del PCA.
	Activación	ReLU	Función adecuada para capturar relaciones no lineales en los datos.
	Regularización	L2 (λ=0.001)	Reduce la magnitud de los pesos y evita el sobreajuste.
Dropout [17]	Tasa	0.3	Desactiva el 30% de las neuronas en cada iteración, obligando al modelo a distribuir mejor la relevancia de las características.
Dense [16]	Unidades	8	Neuronas de la capa.
	Activación	ReLU	Función adecuada para capturar relaciones no lineales en los datos.
	Regularización	L2 (λ=0.001)	Se refuerza la regularización L2 para estabilizar el aprendizaje.
Dropout [17]	Tasa	0.3	Añade otra fase de dropout, promoviendo una mejor generalización del modelo.
Dense [16]	Unidades	1	Neurona única para clasificación binaria.
	Activación	Sigmoid	Función que transforma los valores en probabilidades de pertenencia a una clase.

Fig. 3.

Diseño de la Red Neuronal



Nota. La figura presenta las capas de la red neuronal implementada.

capas densas, donde las primeras dos actúan como capas ocultas con funciones de activación ReLU, y la última corresponde a la capa de salida con activación sigmoide, adecuada para tareas de clasificación binaria. La configuración de esta red neuronal se presentó en la Tabla 3, siguiendo el mismo orden en el que se establecieron las capas.

En la Fig. 3. Se presenta la arquitectura de la red neuronal proporcionada por la función *plot_model* [18] de *Tensorflow Keras*.

Además de su arquitectura, la red neuronal fue implementada con funciones de callback que desempeñan un papel clave en la prevención del sobreajuste. Estas funciones monitorean el comportamiento del modelo durante el entrenamiento, ajustando dinámicamente parámetros como la tasa de aprendizaje o deteniendo el proceso cuando se detecta una mejora marginal en la validación. Gracias a esta estrategia, se logra una mejor generalización, evitando que el modelo memorice los datos de entrenamiento y, en cambio, aprenda patrones representativos de la información.

La Tabla 4 muestra los parámetros configurados para el callback EarlyStopping [19], el cual contribuye a evitar el sobreajuste y optimizar el uso de tiempo y recursos. Su función es interrumpir el entrenamiento cuando el

rendimiento del algoritmo deja de mejorar, evitando cómputos innecesarios y favoreciendo una mejor generalización del modelo.

TABLA IV.

Argumentos para earlystopping

Argumento	Valor	Función
Monitor	val_loss	Métrica para monitorear
Patience	10	Cantidad de épocas consecutivas sin progreso.
Restore_ best_weights	True	Restablece los pesos del modelo utilizando el valor más alto de la métrica que se está monitoreando

La Tabla 5 presenta los parámetros configurados para el callback ReduceLROnPlateau [20], el cual permite ajustar dinámicamente la tasa de aprendizaje. Gracias a esta estrategia, el modelo puede mejorar su convergencia al reducir progresivamente la tasa cuando el progreso se ralentiza, facilitando una optimización más eficiente del entrenamiento.

TABLA V.

Argumentos de reducelronplateau

Argumento	Valor	Función
Monitor	val_loss	Métrica para monitorear
Factor	0.2	Coeficiente que disminuirá la velocidad de aprendizaje (nueva_lr = lr * factor)
Patience	5	La cantidad de épocas sin mejoras tras los cuales se disminuirá la velocidad de aprendizaje
Min_lr	0.001	Tasa de aprendizaje mínima

En la fase de entrenamiento de la red neuronal, esta fue configurada inicialmente con 100 épocas, pero gracias a las funciones callback implementadas no se completaron en su totalidad las épocas configuradas con ello se completan solo 66/100 épocas.

La evaluación del rendimiento de los modelos de clasificación es fundamental en cualquier estudio de aprendizaje automático, ya que permite medir su capacidad predictiva y adecuación para la tarea en cuestión. Para una comparación precisa, se utilizaron métricas clave como exactitud, precisión, Recall, F1-Score y el área bajo la curva ROC (AUC-ROC), determinando el modelo más eficaz en la clasificación de muestras de cáncer de mama. Además, se implementó validación cruzada con 10 pliegues para garantizar una evaluación robusta y minimizar posibles sesgos en los resultados. Este enfoque divide el conjunto de entrenamiento en 10 subconjuntos, utilizando iterativamente 9 para entrenamiento y 1 para prueba, de modo que cada muestra se utiliza en validación exactamente una vez. Los resultados reportados corresponden al promedio y desviación estándar de las métricas obtenidas en los 10 pliegues.

La implementación computacional de este estudio se realizó con herramientas de código abierto ampliamente utilizadas en aprendizaje automático, garantizando un flujo de trabajo reproducible y eficiente. El análisis se llevó a cabo en Jupyter Notebook, un entorno que permite integrar código, gráficos y documentación para mejorar la trazabilidad y comprensión del proceso. Se empleó Python por su flexibilidad y amplia disponibilidad de bibliotecas especializadas en ciencia de datos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESULTADOS.

Como se mencionó anteriormente, en este estudio se utilizó el Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Dataset [12]. Disponible en el UCI Machine Learning Repository. Los resultados obtenidos para cada modelo en el que se implementó dicho conjunto de datos se resumen en Tabla 6, y se presentan en gráficos de desempeño en términos de la matriz de confusión y área bajo la curva ROC (AUC-ROC).

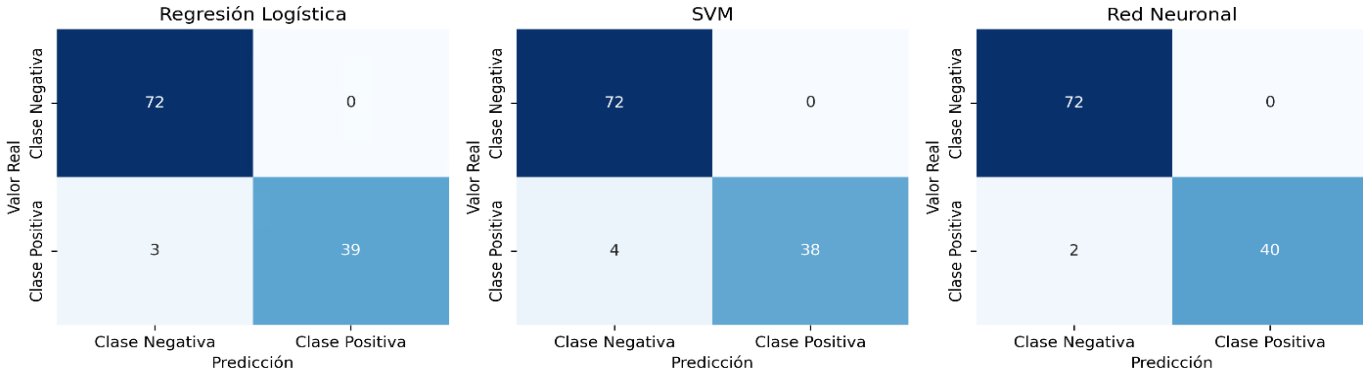
- **Regresión Logística:** El modelo alcanzó una exactitud del 97.36% y una AUC-ROC de 0.96, lo que evidencia una alta capacidad para discriminar entre casos benignos y malignos.
- **Máquinas de Soporte Vectorial (SVM):** Obtuvo una exactitud del 96.49% y una AUC-ROC de 0.95, mostrando un rendimiento ligeramente inferior al de la regresión logística, pero manteniendo una precisión competitiva.
- **Redes Neuronales:** Este modelo logró una exactitud del 98.24% y una AUC-ROC de 0.99, indicando el mejor desempeño entre los algoritmos evaluados y una notable capacidad predictiva.

Se implementó validación cruzada con 10 pliegues, permitiendo estimar la capacidad de generalización de cada algoritmo. Se calcularon exactitud, precisión, Recall y F1-score, obteniendo los valores promedio y desviación estándar para cada modelo como se muestra en la Tabla 7.

Los resultados de la validación cruzada con 10 pliegues confirman la estabilidad de los algoritmos evaluados. La Red Neuronal obtuvo el mejor desempeño promedio (Exactitud = 0.9802 ± 0.02), seguida de SVM (0.9714 ± 0.02) y Regresión Logística (0.9603 ± 0.03). Estos valores refuerzan la consistencia de los hallazgos presentados con la matriz de confusión y la curva ROC, demostrando que la reducción de dimensionalidad mediante PCA no compromete la capacidad predictiva de los modelos.

Fig. 4.

Matrices de Confusión de los Modelos Implementados



Nota. En la figura se puede observar las diferentes matrices obtenidas en base a la evaluación de los algoritmos propuestos.

De igual forma, se obtuvieron gráficos de desempeño. En la Fig. 4, se presentan las matrices de confusión para los tres modelos de clasificación evaluados: Regresión Logística, Máquinas de Vectores de Soporte (SVM), Redes Neuronales. Cada matriz muestra el número de predicciones realizadas por el modelo frente a las clases reales de los datos, proporcionando información detallada sobre los aciertos y errores en las clasificaciones.

En la Fig. 4 se puede observar para cada uno de los modelos un alto número para los verdaderos positivos y los verdaderos negativos, es decir, pacientes que verdaderamente tienen cáncer de mama fueron predichos como Maligno, en contraste con los pacientes que estaban etiquetados como Benigno fueron predichos como Benignos.

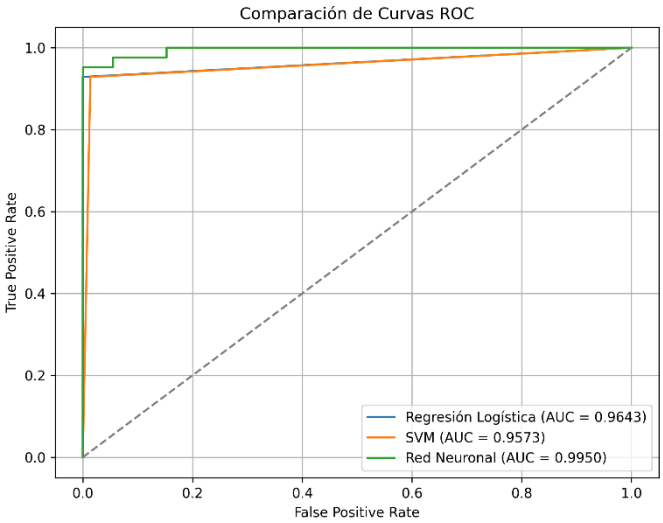
A continuación, se describe el rendimiento de la matriz de confusión en los modelos implementados:

- **Regresión logística:** Según la matriz de confusión, 72 pacientes fueron predichos como tumor benigno y realmente eran pacientes con tumor benignos; 39 pacientes fueron predichos como tumor maligno y realmente eran pacientes con tumor maligno; 3 pacientes fueron predichos como tumor benigno, pero en realidad eran tumor maligno.
- **Máquinas de Soporte Vectorial:** Según la matriz de confusión, 72 pacientes fueron predichos como tumor benigno y realmente eran pacientes con tumor benigno; 38 pacientes fueron predichos como tumor maligno y realmente eran pacientes con tumor maligno; 4 pacientes fueron predichos como tumor benigno, pero en realidad eran tumor maligno.
- **Redes Neuronales:** Según la matriz de confusión, 72 pacientes fueron predichos como tumor benigno y realmente eran pacientes con tumor benignos; 40 pacientes fueron predichos como tumor maligno y realmente eran pacientes con tumor maligno; 2 pacientes fueron predichos como tumor maligno, pero en realidad eran tumor benigno.

Asimismo, en la Fig. 5, se presentan las curvas AUC-ROC para los tres modelos de clasificación analizados. Cada curva representa la relación entre la tasa de verdaderos positivos (sensibilidad) y la tasa de falsos positivos a diferentes umbrales de decisión.

Fig. 5.

Curvas AUC-ROC de los Modelos Implementados



Nota. En la figura se presenta las curvas ROC obtenidas en base a la evaluación de los modelos propuestos.

El análisis de las curvas AUC-ROC para los modelos evaluados muestra un rendimiento excepcional en la clasificación de cáncer de mama. El modelo implementado con una red neuronal obtuvo un área bajo la curva de 0.99, ligeramente superior a los otros dos algoritmos implementados, siendo así el modelo de regresión logística y las máquinas de soporte vectorial obtuvieron un 0.96 y 0.95, respectivamente. Este nivel de rendimiento sugiere que estos modelos son altamente efectivos y confiables para la detección de cáncer de mama.

Un hallazgo relevante es que, pese a la reducción del 83% en la dimensionalidad de los datos, los tres algoritmos mantienen métricas competitivas. En particular, la regresión logística alcanza resultados cercanos a los de la red neuronal, evidenciando que modelos más simples pueden ser adecuados en contextos con limitaciones de cómputo, mientras que las redes neuronales, aunque más complejas, ofrecen la mayor capacidad predictiva.

3.2. DISCUSIÓN

La clasificación del cáncer de mama es un área de investigación crítica, dado su impacto en la salud pública y la importancia de un diagnóstico preciso y oportuno. En este estudio, hemos evaluado la eficacia de varios algoritmos de clasificación aplicados a un conjunto de datos de pacientes con posible cáncer de mama, centrándonos en el rendimiento de modelos como Regresión Logística, Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) y Redes Neuronales. Los resultados obtenidos a través de métricas como las curvas AUC-ROC y las matrices de confusión han proporcionado una visión profunda de la capacidad de estos modelos para discriminar entre clases.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que los algoritmos de aprendizaje automático, particularmente Regresión Logística y Red Neuronal, son herramientas altamente efectivas para la clasificación de tumores mamarios en pacientes con posible cáncer de mama. Ambos modelos lograron una AUC-ROC de 0.96 y 0.99, respectivamente, lo que evidencia su alta capacidad para discriminar entre tumores malignos y benignos en todos los umbrales de probabilidad evaluados. Este rendimiento destaca su potencial para ser implementados en entornos clínicos donde la precisión en el diagnóstico es crítica.

La reducción de dimensionalidad mediante Análisis de Componentes Principales (PCA) jugó un papel fundamental en el éxito de los modelos. El método del codo, utilizado para determinar el número óptimo de componentes principales, permitió identificar un equilibrio adecuado entre la retención de información y la simplificación del modelo. Este enfoque no sólo redujo el tiempo de procesamiento, sino que también mejoró la precisión de los algoritmos al eliminar características redundantes o irrelevantes. Estudios anteriores han reportado beneficios similares al implementar PCA, lo que refuerza su validez como herramienta de preprocesamiento en problemas de clasificación de datos médicos.

Numerosos estudios han explorado el uso de algoritmos de aprendizaje automático para la clasificación de tumores mamarios, proporcionando un marco sólido para contextualizar los resultados de esta investigación. Por ejemplo, en [21] se utilizó el conjunto de datos Asia-Pacific Metaplastic Breast Cancer (AP-MBC) Consortium que consta de 347 casos de cáncer de mama metaplásico de 17 hospitales de Australia y el sudeste asiático. En este estudio fue utilizado algoritmos como: Árboles de decisión, regresión logística, naïve Bayes, perceptrón multicapa y bosque aleatorio, donde dichos algoritmos alcanzaron exactitudes y precisiones de hasta 0.838 y 0.822 respectivamente en el algoritmo de árboles aleatorios.

Asimismo, [6] utilizó varias técnicas de clasificación ML: Naïve Bayes (NB), regresión logística (LR), máquina de vectores de soporte (SVM), K-Nearest Neighbor (KNN), árbol de decisión (DT), y técnicas de conjunto: Random forest (RF), Adaboost, XGBoost en el conjunto de datos de cáncer de mama similar proveniente del Wisconsin Breast Cancer Dataset (WBCD). El autor encontró que tanto el árbol de decisión como el clasificador XGBoost tienen la mayor precisión del 97% entre todos los modelos y el mayor AUC 0,999 obtenido para el clasificador XGBoost.

No obstante, existen diferencias que merecen ser discutidas, en la investigación [22] utiliza algoritmos como Spectral clustering, DBSCAN y k-means, junto con modelos de predicción como Support Vector Machines (SVM), árboles de decisión y Random Forest. Los resultados demuestran la capacidad del modelo para predecir el tiempo que tardará el tumor en reaparecer o el tiempo que tardará el paciente en recuperarse por completo con la mejor precisión del 78,7% utilizando SVM.

A diferencia de estudios previos que reportan únicamente métricas puntuales en particiones de entrenamiento/prueba, este trabajo incorpora validación cruzada con 10 pliegues, lo que asegura que los resultados no dependan de una división específica de los datos. Este procedimiento evidencia que los tres algoritmos mantienen un rendimiento estable en diferentes subconjuntos, con desviaciones estándar reducidas en todas las métricas, lo que refuerza la robustez del enfoque propuesto.

Aunque en este trabajo no se realizó una comparación directa entre modelos con y sin PCA, existen estudios que sí la han realizado y cuyos hallazgos ofrecen un punto de referencia útil. Por ejemplo, en *RF-PCA* combinan PCA con selección de atributos y muestran que el modelo con PCA tiene un desempeño superior en precisión y tiempos de entrenamiento comparados con el modelo original sin reducción dimensional [23]which can effectively solve the problems of insufficient recognition accuracy and long time-consuming in traditional breast cancer diagnosis methods. To solve these problems, we proposed a method of attribute selection and feature extraction based on random forest (RF. También, en el trabajo [24] analiza resultados obtenidos aplicando PCA/KPCA, mostrando que estos métodos mejoran métricas como precisión y sensibilidad frente al uso de todas las variables. En *A Study Using PCA and LDA on Wisconsin Breast Cancer* [25], se evidencia que combinar PCA y LDA permite mantener un rendimiento alto, comparable al que se obtiene con modelos sin reducción, aunque no todos los trabajos informan tiempos de entrenamiento u otros

costos computacionales. Estos estudios apoyan la idea de que la reducción de dimensionalidad puede conservar precisión alta, lo que coincide con nuestros resultados: en nuestros modelos con PCA también obtenemos exactitud, precisión y sensibilidad elevados, lo que sugiere que la pérdida de información no es crítica bajo las condiciones de dimensión reducida empleadas.

Los resultados tienen implicaciones importantes para el desarrollo de sistemas automatizados de apoyo al diagnóstico médico. La alta exactitud y precisión de los modelos sugiere que podrían integrarse en flujos de trabajo clínicos para asistir a los profesionales de la salud en la detección temprana de tumores malignos, reduciendo potencialmente los tiempos de diagnóstico y mejorando las tasas de supervivencia. Aunque ambos modelos muestran un rendimiento excepcional, la variabilidad inherente a los datos clínicos y las características individuales de los pacientes pueden influir en la generalización de estos hallazgos. Por lo tanto, se recomienda realizar estudios adicionales con conjuntos de datos más amplios y diversos para validar la robustez de estos modelos en la práctica clínica real.

Además, desde una perspectiva teórica, este trabajo contribuye al creciente cuerpo de literatura que explora el uso de técnicas de reducción de dimensionalidad y algoritmos de clasificación en datos médicos. El enfoque metodológico empleado puede servir como referencia para futuras investigaciones que busquen optimizar modelos predictivos en dominios similares.

Este trabajo complementa la literatura al mostrar que PCA no solo facilita la reducción de variables, sino que además permite que modelos tradicionalmente menos potentes, como la regresión logística, alcancen niveles de precisión comparables a modelos más complejos. Este hallazgo tiene implicaciones prácticas en el diseño de sistemas de apoyo al diagnóstico, donde la eficiencia y la interpretabilidad son tan relevantes como la exactitud.

A pesar de los resultados prometedores, este estudio presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas. En primer lugar, el conjunto de datos utilizado, aunque ampliamente empleado en investigaciones, no representa necesariamente la diversidad de poblaciones globales. Factores como la etnicidad, la edad y las comorbilidades podrían influir en el desempeño de los modelos cuando se aplican a otras poblaciones.

En segundo lugar, el uso de PCA, aunque beneficioso en términos de rendimiento, implica una pérdida de interpretabilidad de las características originales. En contextos clínicos, esta limitación puede dificultar la aceptación de los modelos por parte de los médicos, quienes podrían preferir enfoques que ofrezcan explicaciones más claras sobre las decisiones del modelo.

Finalmente, los modelos fueron evaluados en un entorno controlado con un conjunto de datos bien definido. Su desempeño en entornos reales podría verse afectado por factores como ruido en los datos, desequilibrio de clases y variabilidad en la calidad de las imágenes o datos clínicos recolectados.

Este estudio presenta un avance significativo en el uso de algoritmos de aprendizaje automático para la clasificación de tumores mamarios. Sin embargo, el desarrollo de sistemas robustos y ampliamente aplicables para este propósito requiere una exploración más profunda y diversa. A partir de aquí, se plantean recomendaciones que pueden orientar futuras investigaciones y aplicaciones en este campo.

El conjunto de datos utilizado en este estudio, aunque reconocido en la comunidad científica, tiene limitaciones inherentes, como su tamaño y representatividad demográfica. Se recomienda incorporar datos de distintas regiones geográficas y demográficas para garantizar que los modelos sean generalizables y efectivos en poblaciones diversas. Esto incluye datos de pacientes con diferentes antecedentes genéticos, edades, y condiciones médicas previas. Además de aumentar la variedad de características clínicas y genéticas para explorar la capacidad de los modelos de identificar patrones complejos relacionados con la aparición de tumores mamarios.

El uso de PCA en este estudio resultó ser altamente beneficioso para la reducción de dimensionalidad, pero existen otras técnicas que podrían complementar o mejorar este enfoque, por ejemplo, el uso de técnicas híbridas combinando PCA con métodos de selección de características como el algoritmo de fuerza bruta análisis de relevancia mutua o métodos basados en entropía. Esto permitiría retener características más relevantes mientras se reduce la complejidad computacional. Adicional a esto, se recomienda evaluar el impacto del número de componentes principales seleccionados en la precisión de los modelos, utilizando enfoques más dinámicos para ajustar este parámetro en función de los datos.

Si bien este estudio se enfocó en modelos tradicionales de aprendizaje automático. Una recomendación de suma importancia sería el uso de redes neuronales profundas, las cuales podrían traer beneficios adicionales. En el caso del uso de redes neuronales convolucionales CNN para datos de imágenes como mamografías lo cual permite integrar automáticamente las características más relevantes en el proceso de clasificación. Sin dejar de lado la implementación de transferencia por aprendizaje, haciendo uso de modelos preentrenados con grandes conjuntos de datos médicos para mejorar la precisión en los conjuntos de datos más pequeños.

La evaluación en escenarios clínicos reales puede conllevar a que los modelos sean validados y probados en entornos reales, esto ayuda a garantizar su aplicabilidad y aceptación. Siendo así, la implementación de estudios piloto en hospitales o clínicas proporciona información valiosa sobre su viabilidad práctica. Asimismo, el desarrollo de interfaces amigables para médicos, donde se podría integrar los modelos en sistemas de apoyo al diagnóstico existentes.

4. CONCLUSIONES

El aporte central de este estudio consiste en demostrar que la reducción de dimensionalidad mediante PCA no compromete la calidad de la clasificación del cáncer de mama, sino que optimiza el uso de recursos computacionales y facilita la interpretación de modelos supervisados. Este demuestra un enfoque reproducible para la clasificación automática de cáncer de mama, combinando reducción de dimensionalidad mediante PCA con algoritmos de aprendizaje automático. Este procedimiento permitió disminuir en un 83% las variables iniciales, manteniendo una exactitud superior al 98%. Los resultados evidencian que técnicas computacionales clásicas, como la regresión logística y las redes neuronales, pueden alcanzar un rendimiento competitivo sin necesidad de arquitecturas de mayor complejidad, lo que las hace viables en escenarios con recursos computacionales limitados.

La inclusión de validación cruzada aporta solidez estadística a los resultados, confirmando que la reducción de dimensionalidad con PCA no solo mejora la eficiencia computacional, sino que mantiene la consistencia de las métricas de clasificación en múltiples particiones de los datos.

Además, la comparación con estudios previos confirma que las métricas obtenidas se ubican en el rango superior de lo reportado en la literatura, lo que respalda la validez metodológica del enfoque. Estos hallazgos refuerzan la importancia de integrar técnicas de preprocesamiento robustas con modelos de clasificación supervisada en problemas de datos biomédicos de alta dimensionalidad.

Como limitación, los experimentos se realizaron sobre un único conjunto de datos de referencia (Breast Cancer Wisconsin), lo que restringe la generalización de los resultados. Futuras investigaciones podrían ampliar este análisis incorporando otros conjuntos de datos biomédicos y explorando la integración de información heterogénea, como imágenes médicas o datos genómicos, para evaluar la escalabilidad y robustez del enfoque en diferentes contextos.

En términos prácticos, este análisis comparativo evidencia que tanto la regresión logística como las redes neuronales pueden integrarse en sistemas de apoyo clínico, siendo la primera más adecuada en entornos con recursos limitados y la segunda en escenarios donde la precisión diagnóstica es prioritaria.

REFERENCIAS

[1] M. M. Cedeño Cedeño *et al.*, «Impact of primary prevention in the early diagnosis and mortality of breast cancer in Ecuador», *Rev. Latinoam. Hipertens.*, vol. 19, n.º 3, abr. 2024, http://doi.org/10.5281/zenodo.10980345.

[2] J. Álvarez Fernández, P. Palacios Ozores, V. Cebey López, A. Cortegoso Mosquera, y R. López López, «Cáncer de mama», *Medicine (Baltimore)*, vol. 13, n.º 27, pp. 1506-1517, mar. 2021, https://10.1016/j.med.2021.03.002.

[3] IBM, «¿Qué es el análisis de componentes principales (PCA)?» [En línea]. Disponible en: https://www.ibm.com/es-es/think/topics/principal-component-analysis

[4] H. Ait Brahim, S. El-Hadaj, y A. Metrane, «Machine learning analysis of breast cancer treatment protocols and cycle counts: A case study at Mohammed vi hospital, Morocco», *Syst. Soft Comput.*, vol. 6, p. 200097, dic. 2024, https://doi.org/10.1016/j.sasc.2024.200097.

[5] M. Emily, F. Meidioktaviana, G. Z. Nabiilah, y J. V. Moniaga, «Comparative analysis of machine learning and survival analysis for breast cancer prediction», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 245, pp. 759-767, nov. 2024, https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.10.302.

[6] V. Nemade y V. Fegade, «Machine Learning Techniques for Breast Cancer Prediction», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 218, pp. 1314-1320, ene. 2023, https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.110.

[7] A. F. Agarap, «On Breast Cancer Detection: An Application of Machine Learning Algorithms on the Wisconsin Diagnostic Dataset», en *Proceedings of the 2nd International Conference on Machine Learning and Soft Computing*, feb. 2018, pp. 5-9. https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.07831.

[8] R. Entezari, «Breast Cancer Diagnosis via Classification Algorithms», 3 de julio de 2018, *arXiv, Toronto, Canadá*: 1807.01334. https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.01334.

[9] H. Benbrahim, H. Hachimi, y A. Amine, «Comparative Study of Machine Learning Algorithms Using the Breast Cancer Dataset», en *AI2SD 2019*, Cham, Springer: Springer International Publishing, feb. 2020, pp. 83-91. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36664-3_10.

[10] E. S. Simant Prakoonwit, «Effective Feature Engineering and Classification of Breast Cancer Diagnosis: A Comparative Study», *BioMedInformatics*, n.º 3, pp. 616-631, agosto de 2023.

[11] S. Aamir *et al.*, «Predicting Breast Cancer Leveraging Supervised Machine Learning Techniques», *Comput. Math. Methods Med.*, vol. 2022, n.º 1, p. 5869529, ago. 2022, https://doi.org/10.1155/2022/5869529.

[12] W. W. Olvi Mangasarian, «Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic)». UCI Machine Learning Repository, 1993. https://doi.org/10.24432/C5DW2B.

[13] H.-Y. Kim, «Statistical notes for clinical researchers: logistic regression», *Restor. Dent. Endod.*, vol. 42, n.º 4, pp. 342-348, sep. 2017, https://doi.org/10.5395/rde.2017.42.4.342.

[14] E. Kavlakoglu, «What Is Support Vector Machine?», IBM. [En línea]. Disponible en: https://www.ibm.com/think/topics/support-vector-machine

[15] F. Chollet, «Keras documentation: The Sequential model». [En línea]. Disponible en: https://keras.io/guides/sequential_model/

[16] Keras Team, «Keras documentation: Dense layer». [En línea]. Disponible en: https://keras.io/api/layers/core_layers/dense/

[17] Keras Team, «Keras documentation: Dropout layer». [En línea]. Disponible en: https://keras.io/api/layers/regularization_layers/dropout/

[18] Keras Team, «Keras documentation: Model plotting utilities». [En línea]. Disponible en: https://keras.io/api/utils/model_plotting_utils/

[19] Keras Team, «Keras documentation: EarlyStopping». [En línea]. Disponible en: https://keras.io/api/callbacks/early_stopping/

[20] Keras Team, «Keras documentation: ReduceLROnPlateau». [En línea]. Disponible en: https://keras.io/api/callbacks/reduce_lr_on_plateau/

[21] Y. Feng *et al.*, «Predicting breast cancer-specific survival in metaplastic breast cancer patients using machine learning algorithms», *J. Pathol. Inform.*, vol. 14, p. 100329, ago. 2023, https://doi.org/10.1016/j.jpi.2023.100329.

[22] S. R. Gupta, «Prediction time of breast cancer tumor recurrence using Machine Learning», *Cancer Treat. Res. Commun.*, vol. 32, p. 100602, jul. 2022, https://doi.org/10.1016/j.ctarc.2022.100602.

[23] K. Bian, M. Zhou, F. Hu, y W. Lai, «RF-PCA: A New Solution for Rapid Identification of Breast Cancer Categorical Data Based on Attribute Selection and Feature Extraction», *Front. Genet.*, vol. 11, sep. 2020, https://doi.org/10.3389/fgene.2020.566057.

[24] R. Pirchio, «Clasificación de cáncer de mama con técnicas de análisis de la componente principal-Kernel PCA, algoritmos de máquina de vectores de soporte y regresión logística», *MediSur*, vol. 20, n.º 2, pp. 199-209, abr. 2022.

[25] G. Esen, A. Altaibek, J. Amankulov, B. Matkerim, y M. Nurtas, «Enhancing Breast Cancer Detection with Dimensionality Reduction Techniques: A Study Using PCA and LDA on Wisconsin Breast Cancer Data», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 251, pp. 414-421, dic. 2024, https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.11.128.

ANEXOS

TABLA VI.

Métricas de evaluación

Modelo	Exactitud	Precisión	Recall	F1-Score
Regresión Logística	0.97	1.00	0.92	0.96
Máquinas de Soporte Virtual	0.96	1.00	0.90	0.95
Redes Neuronales	0.98	1.00	0.95	0.97

TABLA VII.

Métricas de la validación cruzada

Modelo	Exactitud	Precisión	Recall	F1-Score
Regresión Logística	0.96 ± 0.03	0.96 ± 0.03	0.92 ± 0.06	0.94 ± 0.04
Máquinas de Soporte Virtual	0.97 ± 0.02	0.99 ± 0.02	0.92 ± 0.06	0.95 ± 0.03
Redes Neuronales	0.98 ± 0.02	0.97 ± 0.04	0.96 ± 0.05	0.96 ± 0.04

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

INGENIO
2026, VOL 9(1), ENERO - JUNIO, PP. 026-050

REVISTA INGENIO

FPGA-Based Simulation of Open Wi-Fi Service Using the Analog Devices SDR Platform

Simulación basada en FPGA de un servicio Wi-Fi abierto utilizando la plataforma SDR de dispositivos analógicos

Holger Santillán | Salesian Polytechnic University, UPS Telecommunications Systems Research Group - GISTEL (Ecuador)
Arleth Rodríguez | Salesian Polytechnic University, UPS Telecommunications Systems Research Group - GISTEL (Ecuador)
Erick García | Salesian Polytechnic University, UPS Telecommunications Systems Research Group - GISTEL (Ecuador)

Recibido: 20/10/2025
Recibido tras revisión: 31/10/2025
Aceptado: 4/11/2025
Publicado: 28/1/2026

KEY WORDS
FPGA, Software Defined Radio (SDR), Open Wi-Fi, Wireless Communication, Signal Processing.

ABSTRACT
The paper presents a simulation of open Wi-Fi service using the Analog Devices ADRV9364-Z7020 card, which integrates an FPGA-based architecture. The proposal seeks to analyze the behavior of wireless communication within a telecommunications system implemented using software-defined radio (SDR).

During development, the installation, configuration, and verification stages of the logic blocks associated with the routing protocol were carried out, in addition to parameter optimization and testing with specialized simulation tools. Subsequently, the system's performance was evaluated under different operating conditions, considering the 2.4 GHz and 5 GHz bands.

The results obtained show that the equipment used offers stable and adaptable performance, with an adequate level of sensitivity for monitoring environments, intrusion detection, and commercial applications, highlighting its potential for real implementations of experimental wireless networks.

PALABRAS CLAVE
FPGA, SDR, Wi-Fi, Comunicación inalámbrica, Procesamiento de señal.

RESUMEN
El trabajo presenta una simulación del servicio de Wi-Fi abierto empleando la tarjeta Analog Devices ADRV9364-Z7020, que integra una arquitectura basada en FPGA. La propuesta busca analizar el comportamiento de la comunicación inalámbrica dentro de un sistema de telecomunicaciones implementado mediante radio definida por software (SDR).

Durante el desarrollo se realizaron las etapas de instalación, configuración y verificación de los bloques lógicos asociados al protocolo de enrutamiento, además de la optimización de parámetros y pruebas con herramientas de simulación especializadas. Posteriormente, se evaluó el rendimiento del sistema bajo distintas condiciones de operación, considerando las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz.

Los resultados obtenidos evidencian que el equipo empleado ofrece un desempeño estable y adaptable, con un nivel de sensibilidad adecuado para entornos de monitoreo, detección de intrusiones y aplicaciones comerciales, destacando su potencial para implementaciones reales de redes inalámbricas experimentales.

1. INTRODUCTION

This work was developed internally at the institution with the aim of strengthening competencies in the field of wireless communication networks and promoting future lines of collaborative research. It also seeks to promote the generation and dissemination of applied knowledge, contributing both to the academic environment and to the technological development of the community.

The project is based on the implementation of a software-defined radio (SDR) system based on the Xilinx Zynq XC7Z020-1CLG400I processor, whose architecture allows flexible updating using high-level programming languages such as C/C++, Java, and Python [1]. The IEEE 802.11 standard is adopted as a technical reference, especially its most recent versions, which have significantly improved the performance of wireless networks,

https://doi.org/10.29166/ingenio.v9i1.8936
2025 Universidad Central del Ecuador
CC BY-NC 4.0 —Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional
pISSN 2588-0829
eISSN 2697-3243
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

bringing them closer to the behavior of conventional Ethernet networks [2].

Several studies complement this research. In [3], for example, the performance of an OpenWRT-based router on Raspberry Pi 4 and Cisco 1905 platforms was analyzed, obtaining average reception (RX) speeds of 964 Mbps and 963 Mbps, and transmission (TX) speeds of 947 Mbps and 963 Mbps. In [4], the multipoint CSI localization technique was applied in OpenWiFi environments, comparing the results with emulation models. For its part [5] proposed a system for predicting quality of service parameters using OpenWRT and NoDogSplash, modifying the router's firmware to generate a captive portal [6].

These works demonstrate the versatility of OpenWRT and its value in the evaluation of routers, location techniques, and quality of service analysis, providing innovative solutions in different wireless communication contexts [3].

Finally, the experiments carried out in this study allowed us to observe the behavior of the equipment, the quality of the link, and the influence of the antenna position. Initial results indicate that the device performs better in short-range links, making it particularly suitable for indoor applications. These findings provide a useful basis for assessing its potential implementation in practical network scenarios.

2. RELATED WORK AND METHOD

2.1. RELATED WORK

2.1.1. Evolution of wireless networks and IEEE 802.11 standards

Wireless networks have transformed the interconnection between devices, reducing dependence on cables and facilitating more agile and flexible installations. This advance has enabled immediate transmission of information, with notable improvements in performance and quality of service [7]. Wireless communications are now central to digital transformation, driven by continuous investment in technological infrastructure [8].

Wi-Fi technology, based on the IEEE 802.11 standard, has established itself as an essential tool in modern computing [9]. The progressive adoption of variants of the standard has made it possible to achieve transfer rates comparable to traditional Ethernet networks, thanks to optimizations in the physical layer and the MAC layer [10]. The most recent versions integrate MIMO (Multiple Input Multiple Output) schemes that allow speeds greater than 100 Mbps in the 2.4 GHz and 5 GHz bands [11].

2.1.2. Software-Defined Radio (SDR) and the OpenWiFi Project

In the context of wireless network research, software-defined radio (SDR) has gained relevance as a versatile and low-cost solution. Its architecture allows functions traditionally implemented in hardware to be transferred to programmable environments, offering flexibility, portability, and cost reduction compared to dedicated solutions [12].

One of the most representative projects in this field is OpenWiFi, an open-source initiative developed by engineers at Ghent University (Belgium). This project addresses the implementation of the IEEE 802.11 standard on SDR platforms, facilitating experimentation in wireless network research and development [13]. OpenWiFi can run on various devices and has demonstrated its potential in multi-access configurations and 4G/5G research environments [14].

The OpenWiFi embedded system is based on the Linux mac80211 framework, complying with the specifications of the IEEE 802.11 standard. Its structure consists of two parts: the Processing System, responsible for the upper layers and data link, and the Programmable Logic (FPGA) [15], which executes the real-time functions of the physical layer [13]. This separation allows for a modular and reconfigurable design, ideal for highly flexible experimental platforms [16].

2.1.3. OpenWRT applications and wireless location systems

The OpenWRT system, widely used in routers and gateways, has proven its usefulness in various network evaluation and location technique projects. In [3], the performance of an OpenWRT-based router using Raspberry Pi 4 and Cisco 1905 was analyzed, achieving average reception (RX) speeds of 964 Mbps and transmission (TX) speeds of 947 Mbps. Meanwhile, in [4], a multipoint Channel State Information (CSI) location system was implemented, achieving superior results compared to simulated environments.

In another study, [5] proposed a predictive model of service quality using OpenWRT and NoDogSplash, modifying the router's firmware to include a captive portal. These works demonstrate the potential of open systems to develop reproducible and adaptable test environments in the field of wireless communications.

2.1.4. Principles of signal transmission and propagation

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) modulation forms the basis of most modern wireless communication standards [17]. Its principle is based on the insertion of a cyclic prefix (CP), which replicates the final part of the OFDM symbol to compensate for channel dispersion and avoid intersymbol interference [18].

Compared to single carrier (SC) or spread spectrum (DSSS) schemes, OFDM has higher synchronization requirements and greater sensitivity to phase noise [19], although it significantly improves spectral efficiency.

To complement the characterization of propagation, the Fresnel zone describes the ellipsoidal volume between the transmitter and receiver within which obstacles must be kept clear to avoid diffraction losses [20].

To determine the radius of the nth Fresnel zone, the following is used:

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d}} \quad (1)$$

Replacing the wavelength with the frequency of the signal relative to the speed of light in a vacuum, we obtain the following:

$$R_n = 548\sqrt{\frac{d_1 d_2}{d \cdot f}} \quad (2)$$

d_1 : the distance from the transmitter to the re ection point (in kilometers).
d_2 : the distance from the receiver to the re ection point (in kilometers).
D : the total distance between the transmitter and receiver, d1+d2 (in kilometers).
R_n: radius of the nth Fresnel zone (m).
n : zone number (normally the rst zone is used, n = 1).
f : signal frequency (GHz).
λ : Wavelength (m)

ese zones determine the di erent contributions to the total eld of the receiver, the most important being the rst Fresnel zone, which contains 50% of the wave's pow

2.1.5. SDR hardware platforms and development modules

The AD9364 family from Analog Devices includes high-performance radio frequency transceivers designed for 3 and 4G applications. In particular, the ADRV9364-Z702 card, based on the Xilinx Zynq-7000 processor, o ers a operating range between 70 MHz and 6.0 GHz, making an ideal tool for prototyping SDR systems [21].

Analog Devices' SDR carrier module allows for 1x and 2x2 con gurations, with access to Ethernet, USB JTAG, and serial interfaces, as well as 100-pin connect that facilitate system expansion [22].

e development board generates power rails and provides adjustable voltages for the FPGA's logic inputs and outputs, integrating measurement points for power consumption and voltage control [23].

is architecture combines performance and -e xibility, providing a solid foundation for research and development projects in recon gurable wireless communication systems.

2.1.6. Wi-Fi network analysis and diagnostic tools

The Inssider software, developed by Metageek, allows the quality of Wi-Fi connections to be analyzed and optimized by identifying interference and channel con icts. Although it is only available for Windows, the LinSSID alternative in Linux environments o ers similar functionality [24].

ese tools are useful in evaluating channel quality and detecting dead zones or tra c overload, which are fundamental aspects when designing and adjusting OpenWiFi and SDR-based networks.

2.2. METHOD

2.2.1. Test bench design

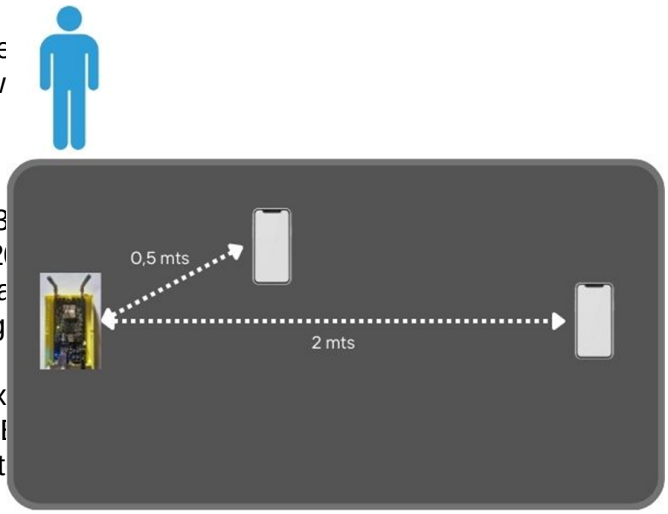
The test bench was developed at the Optical Communications Laboratory, where various experimental scenarios were de ned to evaluate the system's performance under di erent operating conditions.

Each scenario considered transmission and reception rate measurements (Mbps), varying the distance between devices and the presence of obstacles in the line of sight. is approach allowed us to obtain representative data on the performance of the equipment in real, uncontrolled environments.

Fig. 1 illustrates the general layout of the tests, in which the host devices are located at di erent distances from the access point to analyze power loss, delay, and link stability. In this way, we seek to establish a comparative behavior between ideal conditions and partially obstructed environments.

Fig 1.

Assessment area



2.2.2. System configuration and evaluation network

The experimental network, shown in Fig. 2, was designed using the Analog Devices ADRV9364-Z7020 card, installed on the ADRV1CRR-BOB breakout board.

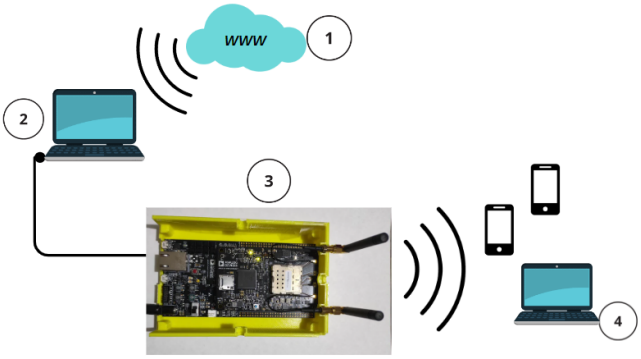
e OpenWiFi service was implemented on this platform to analyze wireless communication in terms of data rate, response time, and signal quality, establishing connections with a cellular device and a computer.

e system diagram consists of the following elements:

1-Internet connection: Provides access to the main network and connectivity to the Admin Computer, through which data from devices connected to the access point is routed.

Fig 2.

Wireless Communication Network Diagram



2-Admin Computer: Acts as the main node of the system, responsible for the installation, con guration, and control of the network. It also acts as a route and rewall once the OpenWiFi service is active.

3-FPGA cards: ese act as wireless transceivers, managing both the transmission and reception of data to the Admin Computer.

4-Host devices: ese represent the client devices-connected to the network generated by the FPGAs. ese devices are used to validate the connectivity, speed, and stability of the link.

2.2.3. Configuration and connection procedure

During configuration, on-board mode was used for direct command execution on the FPGA board. On the main PC, a static IP address of 192.168.10.1 with a mask of 255.255.255.0 was set, corresponding to the OpenWiFi network segment.

Subsequently, the system was accessed using the command: ssh root@192.168.10.122 with the default password "openwi , which allowed logging into the system interface.

Before activating Access Point mode, speci c functional settings were executed through the SSH console (detailed in the appendices). Once this con guration was complete, the SSID "openwi " became visible to nearby devices, allowing connection using the password "openwi ." e connected devices received IP addresses within the range 192.168.13.x, ensuring correct DHCP assignment.

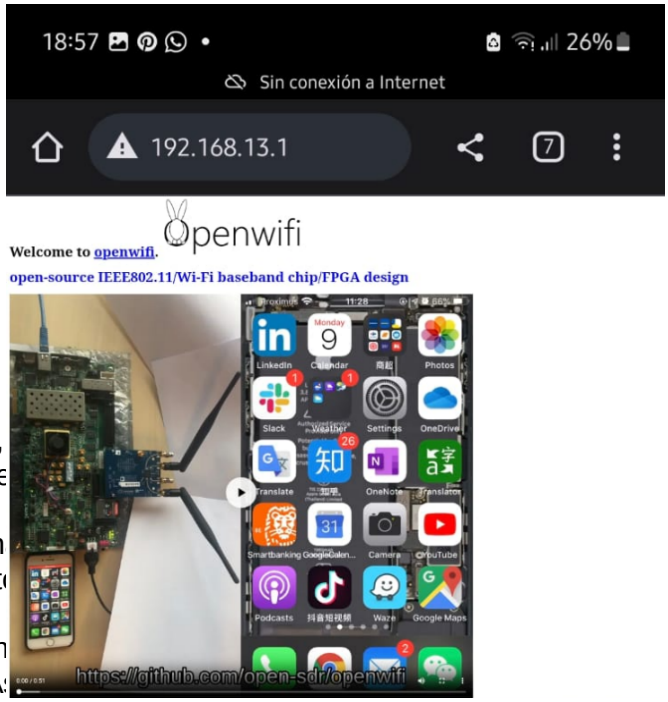
2.2.4. Link verification and gateway access

Fig. 3 shows the gateway verification process, a fundamental step in con rming system connectivity.

A er establishing the connection, the address 192.168.13.1, corresponding to the web interface hosted locally on the FPGA board, was entered into the device's browser. Successful access to this page con rmed the operation of the access point and bidirectional communication with the hosts.

Fig 3.

View of the gateway from the browser of a computer connected to the network



Finally, routing/NAT was con gured on the Admin Computer to allow Internet access from devices connected to OpenWiFi. e commands used for this stage are detailed in the technical annexes, along with the additional network con gurations necessary for the system to function properly.

2.2.5. Experimental validation

With the operating system and configurations in place, connectivity tests and performance measurements were performed using network diagnostic tools.

e parameters evaluated included transmission rate (TX), reception rate (RX), packet loss, average latency, and link stability. e results of these measurements were then used to compare the behavior of the system in di erent scenarios of distance and physical obstruction.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. RESULTS

3.1.1. General performance evaluation

The results obtained come from the analysis of several experimental scenarios designed to evaluate the performance of the OpenWiFi system implemented on the ADRV9364-Z7020 card.

e measurements were performed using Inssider software, complemented by quality of service (QoS) tests and link drop detection using terminal commands.

These evaluations allowed us to observe the behavior of the network as a function of distance, the presence of obstacles, and variations in signal strength.

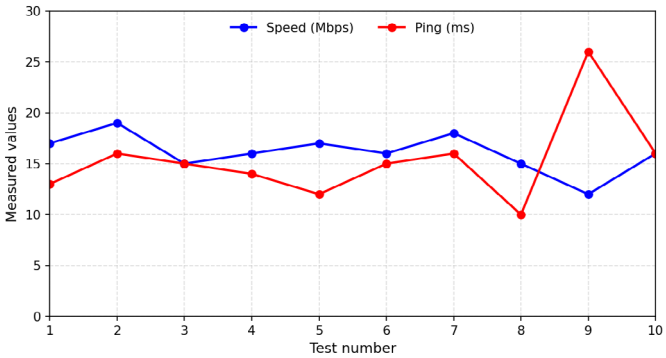
3.1.2. Tests without obstacles

The first test bench consisted of measuring the performance of the wireless link with a direct line of sight between the host devices and the access point.

Fig. 4 shows the variation in the connection speed of the devices at a distance of 1 meter, represented by the blue line. e same graph shows the evolution of the ping overtime, which allows us to identify the stability of the link and its responsiveness under ideal conditions.

Fig 4.

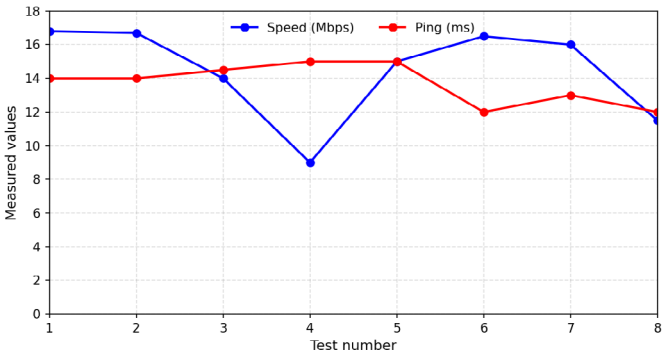
Performance Evaluation of Speed and Ping at a 1m Distance



Subsequently, the distance was increased to 1.5 meters while maintaining line of sight. Fig. 5 shows the evolution of average speed and latency, where a slight decrease in the transfer rate can be seen, associated with the natural dispersion of the electromagnetic eld and the attenuation of the received power level.

Fig 5.

Performance Evaluation of Speed and Ping at a 1.5m Distance



3.1.3. Tests with obstacles

In the second set of tests, physical obstructions were introduced in the line of sight between the host devices and the access point, maintaining the same distance as before. Fig. 6 in annex, shows the results at 1 meter with obstacles, showing a noticeable reduction in average transfer speed and an increase in ping variability, indicating greater uctuation in link quality.

Similarly, Fig. 7 shows the behavior of the system at 1.5 meters with obstacles, where an increase in response times and a partial loss of connection stability can be observed.

3.1.4. Signal strength and link stability

The Inssider software allowed the Wi-Fi signal strength to be recorded in both scenarios.

Fig. 8 shows the record obtained during the test with obstruction, in which intervals of disturbance and momentary signal drop are identi ed. ese uctuations correspond to temporary variations in channel attenuation and propagation delay.

In contrast, Fig. 9 shows the behavior of the signal strength without obstruction, where the trace remains stable over time, evidencing a continuous link with low variability.

Overall, the results re ect the sensitivity of the system to physical interference and con rm the correct operation of the OpenWiFi service at short distances under controlled conditions.

3.1.5. Comparative analysis

Comparing both scenarios, it was observed that the average transmission and reception speed decreases progressively as the distance increases or obstacles are introduced.

At 1 meter without obstacles, the link maintained stable communication with minimal latency and negligible packet loss. In contrast, at 1.5 meters with obstacles, there was an increase in delay and a moderate drop in throughput, although without total loss of the link.

ese observations con rm that the ADRV9364-Z7020 platform with OpenWiFi service is optimal for short-range links, making it ideal for indoor environments or experimental laboratory applications where line of sight can be guaranteed.

3.2. DISCUSSION

3.2.1. System performance analysis

During the experiment, notable variations were identified in the transmission and reception speeds of the OpenWiFi system implemented on the ADRV9364-Z7020 card.

Fig. 10 shows the relationship between both variables throughout the day, revealing uctuations linked to the network load in the laboratory.

Around 12:00 p.m., a signi cant decrease in average speed was recorded due to the activity of a user who accessed high-de nition content, which increased bandwidth consumption.

Subsequently, around 1:00 p.m., the speed reached a maximum of close to 900 Mbps, stabilizing as interference from surrounding networks decreased.

Complementarily, Fig. 11 shows the results obtained a er disconnecting the other active networks in the environment.

In this case, the system reached transmission peaks of up to 1.0 Gbps, demonstrating that electromagnetic interference and channel competition directly in uence the overall performance of the wireless link.

is behavior highlights the sensitivity of the system to environmental conditions and the importance of spectrum planning in shared environments.

3.2.2. Comparison with previous studies

The results obtained are consistent with those described by the research team in [5], who conducted tests under similar conditions using FPGA platforms and the OpenWRT operating system.

In both cases, the measurements con rm that environmental variability and the number of simultaneous networks have a direct impact on quality of service (QoS) and e ective transfer rate.

However, the commercial routers analyzed in [5] showed greater sustained transmission capacity due to their optimized architecture and mature rmware.

In contrast, the experimental con guration of this study based on OpenWiFi shows greater exibility for system customization, making it a viable alternative for research, simulation, and teaching scenarios for programmable wireless networks.

3.2.3. Applicability of the ADRV9364-Z7020 + Open WiFi system

The ADRV9364-Z7020 platform proved to be suitable for experimentation in SDR networks thanks to its adaptability and recon gurability via so ware [10].

e OpenWiFi environment enabled the execution of advanced functions such as intrusion detection, IQ frame capture, channel state information (CSI) analysis, and radar emulation or network fuzzer [11].

ese features make the system a versatile tool for research projects in security, spectrum modeling, and wireless performance evaluation under controlled conditions.

3.2.4. Implications and final observations

The comparative analysis suggests that OpenWRT remains a preferred choice for commercial applications and router evaluations, thanks to its extensive package library and support community.

However, OpenWiFi represents an open environment that favors direct understanding and manipulation of the physical and MAC layers, something that is not readily accessible on closed platforms. Consequently, the system proposed in this work is ideal for academic laboratories, protocol testing environments, interference simulations, and short-range spectral performance studies [18].

4. CONCLUSIONS

During testing, it was verified that the ADRV9364-Z7020 equipment has an automatic shutdown feature a er approximately four hours of continuous operation, which represents a practical limitation for prolonged unsupervised testing. It was also observed that wireless link performance is a ected by the movement of host equipment and the presence of obstacles in the line of sight between the transmitter and receiver, causing variations of up to 15% in e ective transmission speed. Quality of service (QoS) was found to be closely related to antenna gain and spatial orientation, factors that determined the level of directivity and channel stability. On average, the system maintained a link e ciency of 92%, with losses of less than 8% under controlled conditions and latency ranging from 18 to 35 ms depending on the level of interference present. ese results con rm that the equipment is more suitable for short-range links, particularly in indoor environments where propagation and antenna position can be precisely controlled.

e ndings allow for a clearer assessment of the device's viability in di erent contexts of use, from academic experimentation to the design of speci c communication systems. e information obtained provides a solid basis for deciding on its implementation according to the needs of coverage, stability, and system e ciency. For those working with this type of platform, it is recommended to use Linux-based operating systems, given their exibility for programming, automation, and driver debugging, as well as their ease of integration with scienti c development libraries. It is also advisable to perform a preliminary review of the physical and functional status of the hardware before each test to detect possible failures or incompatibilities that could compromise the performance or security of the system.

Finally, it is suggested to take advantage of the tools and resources provided by Analog Devices, particularly the OpenWiFi environment, for the development of educational and research projects aimed at evaluating SDR networks, experimenting with channel parameters, and simulating interference conditions. ese results con rm that the ADRV9364-Z7020 device is a valuable platform for teaching and analyzing programmable wireless communications, and that its correct con guration can o er competitive performance compared to higher-cost commercial solutions, if it is kept within controlled distance and power ranges.

REFERENCES

[1] Y. Liu, H. Liu, M. Zhang, P. Chen, and F. Yang, "So ware De ned Radio Implementation of an

enhanced LTE-WiFi Aggregation System," presented at the 2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Beijing, China, Aug. 2018, pp. 604–608. doi: 10.1109/ICCChina.2018.8641258.

[2] F. Tramarin, A. K. Mok, and S. Han, "Real-Time and Reliable Industrial Control Over Wireless LANs: Algorithms, Protocols, and Future Directions," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 6, pp. 1027–1052, Jun. 2019, doi: 10.1109/JPROC.2019.2913450.

[3] J. Damasceno, J. Dantas, and J. Araujo, "Network Edge Router Performance Evaluation: An OpenWrt-Based Approach," presented at the 2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Madrid, Spain, Jun. 2022, pp. 1–6. doi: 10.23919/CISTI54924.2022.9820027.

[4] L. Ghiro, M. Cominelli, F. Gringoli, and R. L. Cigno, "On the Implementation of Location Obfuscation in openwi and Its Performance," presented at the 2022 20th Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet), Pafos, Cyprus, Jun. 2022, pp. 64–73. doi: 10.1109/MedComNet55087.2022.9810411.

[5] M. Ateeq, M. K. Afzal, S. Anjum, and B.-S. Kim, "Cognitive quality of service predictions in multi-node wireless sensor networks," *Computer Communications*, vol. 193, pp. 155–167, Sep. 2022, https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.06.042.

[6] L. Ye, B. Chen, C. Sun, S. Wang, P. Zhang, and S. Zhang, "A Study of Semi-Fungible Token based Wi-Fi Access Control," presented at the 2024 IEEE 24th International Conference on Communication Technology (ICCT), Chengdu, China, Oct. 2024, pp. 722–727. doi: 10.1109/ICCT62411.2024.10946664.

[7] S. Chakrabarty and D. W. Engels, "Secure Smart Cities Framework Using IoT and AI," presented at the 2020 IEEE Global Conference on Arti cial Intelligence and Internet of ings (GCAIoT), Dubai, United Arab, Dec. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/GCAIoT51063.2020.9345912.

[8] B. Li, Z. Fei, C. Zhou, and Y. Zhang, "Physical-Layer Security in Space Information Networks: A Survey," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 33–52, Jan. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2943900.

[9] C. Chen, H. Song, Q. Li, F. Meneghello, F. Restuccia, and C. Cordeiro, "Wi-Fi Sensing Based on IEEE 802.11bf," *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 1, pp. 121–127, Jan. 2023, doi: 10.1109/MCOM.007.2200347.

[10] D. M. Molla, H. Badis, L. George, and M. Berbineau, "So ware De ned Radio Platforms for Wireless Technologies," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 26203–26229, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3154364.

[11] X. Jiao, W. Liu, M. Mehari, M. Aslam, and I. Moerman, "openwi : a free and open-source IEEE802.11 SDR implementation on SoC," presented at the 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), Antwerp, Belgium, May 2020, pp. 1–2. doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128614.

[12] S. Bräuer, A. Zubow, and F. Dressler, "Towards So ware-Centric Listen-Before-Talk on So ware-De ned Radios," presented at the 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Nanjing, China, Mar. 2021, pp. 1–7. doi: 10.1109/WCNC49053.2021.9417395.

[13] Z. Yun, P. Wu, S. Zhou, A. K. Mok, M. Nixon, and S. Han, "RT-WiFi on So ware-De ned Radio: Design and Implementation," presented at the 2022 IEEE 28th Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS), Milano, Italy, May 2022, pp. 254–266. doi: 10.1109/RTAS54340.2022.00028.

[14] J. Navarro-Ortiz *et al.*, "Combining 5G New Radio, Wi-Fi, and LiFi for Industry 4.0: Performance Evaluation," *Sensors*, vol. 24, no. 18, p. 6022, Sep. 2024, https://doi.org/10.3390/s24186022.

[15] Z. Lei, X. Qiu, Z. Lei, and Z. Lei, "Research on So ware Radio Signal Processing Technology Based on FPGA for OpenWi ," presented at the 2024 3rd International Conference on Electronics and Information Technology (EIT), Chengdu, China, Sep. 2024, pp. 61–66. doi: 10.1109/EIT63098.2024.10762444.

[16] H. J. Santillán Carranza, J. D. Ochoa Ayala, J. A. Ordoñez Guzmán, and P. M. A. Wong Wong, "Implementation of a Weather Station Using FPGA with Real Time Data Access and Analysis," *INGENIO*, vol. 8, no. 2, pp. 53–66, Jul. 2025, https://doi.org/10.29166/ingenio.v8i2.7449.

[17] J. Li, S. Dang, Y. Huang, P. Chen, X. Qi, and M. Wen, "Composite Multiple-Mode Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 6, pp. 3748–3761, Jun. 2023, doi: 10.1109/TWC.2022.3220752.

[18] R. Estrada, I. Valeriano, X. Aizaga, L. Vargas, N. Vera, and D. Zambrano, "WiFi Indoor Positioning System Based on OpenWRT," presented at the IEEE EUROCON 2023 - 20th International Conference on Smart Technologies, Torino, Italy, Jul. 2023, pp. 728–733. doi: 10.1109/EUROCON56442.2023.10199056.

[19] I. Khan, M. Che ena, and M. M. Hasan, "Data Aided Channel Estimation for MIMO-OFDM Wireless Systems Using Reliable Carriers," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 47836–47847, Apr. 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3269659.

[20] W. Hao *et al.*, "Robust Design for Intelligent Reflecting Surface-Assisted MIMO-OFDMA Terahertz IoT Networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 16, pp. 13052–13064, Aug. 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3064069.

[21] V. Grigoriev, A. Komissarov, K. Ryutin, and G. Fokin, "So ware-De ned Radio Wireless Communication

Technology Design. LibreSDR Board Validation," presented at the 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, Mar. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496728.

[22] D. D. Langer *et al.*, "Robust and Reconfigurable On-Board Processing for a Hyperspectral Imaging Small Satellite," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 15, p. 3756, Jul. 2023, https://doi.org/10.3390/rs15153756.

[23] M. Majoral, J. Arribas, and C. Fernández-Prades, "Implementation of a GNSS Rebroadcaster in a All-Programmable System-On-Chip Platform," presented at the 2022 10th Workshop on Satellite Navigation Technology (NAVITEC), Noordwijk, Netherlands, Apr. 2022, pp. 1–9. doi: 10.1109/NAVITEC53682.2022.9847537.

[24] X. Cui, J. Yang, and C. Wu, "Improved Genetic Algorithm to Optimize the Wi-Fi Indoor Positioning Based on Arti cial Neural Network," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 74914–74921, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988322.

ANNEXES

Fig 6.

Speed and Ping Performance at 1m with Obstacle

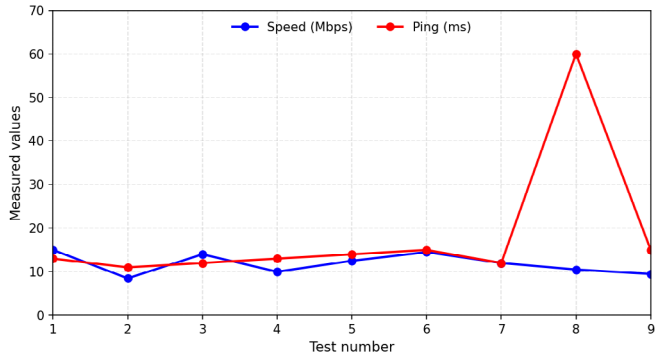


Fig 7.

Speed and Ping Performance at 1.5m with Obstacle

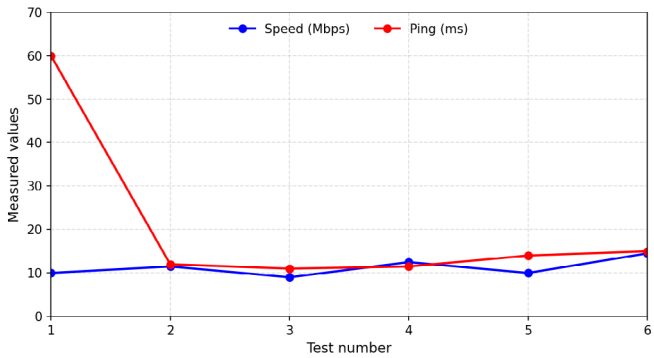


Fig 8.

Signal strength test with link intrusion

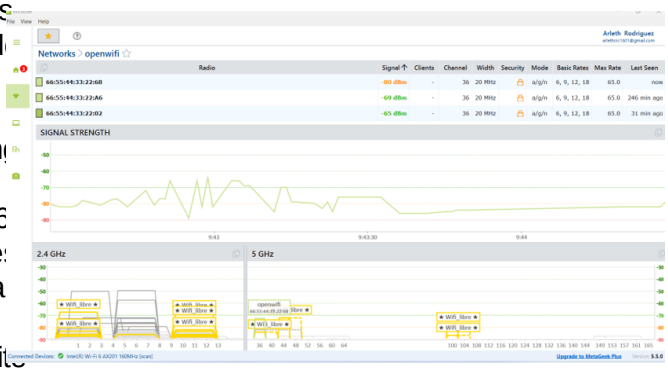


Fig 9.

Signal strength measurement under non-intrusive link conditions

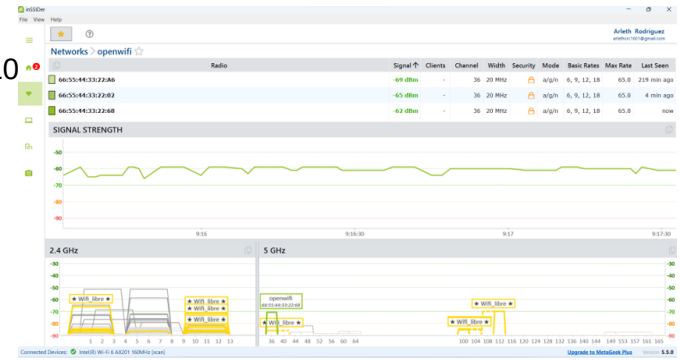


Fig 10.

Relationship between transmission and reception speed of the devices

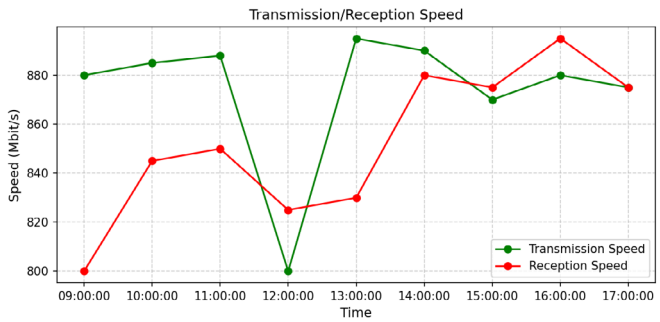
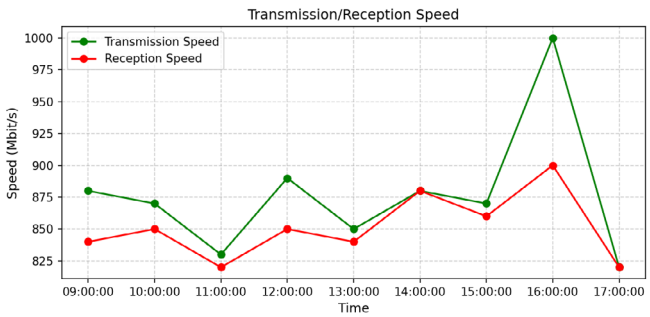


Fig 11.

Data transmission peak after disabling other active networks.



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

INGENIO
2025, VOL 9(1), JULIO - DICIEMBRE, PP. 026-042

REVISTA INGENIO

Urban Morphology and Structure as Sustainability Indicators in Crucita la Bella, Manabí, Ecuador

Morfología y estructura urbana como indicadores de sostenibilidad en Crucita la Bella, Manabí, Ecuador

Jhonny Leonardo Álvarez Ochoa | UTE University, Faculty of Architecture and Urbanism, UTE University
Carlos Patricio Zambrano Solórzano | UTE University, Master in Urbanism with a mention in Sustainable Urban Planning

Recibido: 18/9/2025
Recibido tras revisión: 13/10/2025
Aceptado: 31/10/2025
Publicado: 16/1/2026

KEY WORDS
Urban Morphology, Urban Structure, Sustainability, Cartography, Urban Indicators, Strategies, Resilience.

ABSTRACT
This article provides a detailed analysis of the morphology and urban structure of the parish of Crucita la Bella, located in the province of Manabí, Ecuador. It reveals profound urban weaknesses linked to the spontaneous growth of the parish, the disorder of land use, the lack of planning, the scarcity of green areas and the lack of public infrastructure. Despite these weaknesses, strengths have been identified that allow the formulation of concrete proposals for improvement. Through the development of thematic maps and multivariate analysis, sustainable intervention strategies are established based on road reorganization, strategic pedestrianization, the creation of green circuits and the integration of resilient solutions to climate change. These proposals focus on improving sustainability indicators such as population density, land use, accessibility, road connectivity, proportion of green spaces, energy efficiency, quality of public space and sustainable mobility. In this context, a comprehensive intervention is foreseen that will include the zoning of urban intervention polygons as general strategies, applying key urban indicators to evaluate the current state of sustainability in the locality. Thus, the article seeks to provide a useful technical and conceptual basis for decision-making in land-use planning and coastal urban resilience policies, promoting a more orderly and sustainable development in the region. This comprehensive approach will improve the quality of life of the inhabitants and strengthen the culture.

PALABRAS CLAVE
Morfología Urbana, Estructura Urbana, Sostenibilidad, Cartografía, Indicadores Urbanos, Estrategias, Resiliencia.

RESUMEN
El presente artículo realiza un análisis detallado de la morfología y estructura urbana de la cabecera parroquial de Crucita la Bella, ubicada en la provincia de Manabí, Ecuador. Se identifican profundas debilidades urbanas vinculadas al crecimiento espontáneo de la parroquia, el desorden en el uso del suelo, la falta de planificación, la escasez de áreas verdes y las carencias de infraestructura pública. A pesar de estas debilidades, se han identificado fortalezas que permiten formular propuestas concretas de mejora. A través de la elaboración de mapas temáticos y análisis multivariados, se establecen estrategias sostenibles de intervención basadas en la reorganización vial, la peatonalización estratégica, la creación de circuitos verdes y la integración de soluciones resilientes frente al cambio climático. Estas propuestas se centran en mejorar indicadores de sostenibilidad, como la densidad poblacional, el uso del suelo, la accesibilidad, la conectividad vial, la proporción de espacios verdes, la eficiencia energética, la calidad del espacio público y la movilidad sostenible. En este contexto, se prevé una intervención integral que incluirá la zonificación de polígonos de intervención urbana como estrategias generales, aplicando indicadores urbanos clave para evaluar el estado actual de sostenibilidad en la localidad. Es así como el artículo busca aportar una base técnica y conceptual útil para la toma de decisiones en políticas de ordenamiento territorial y resiliencia urbana costera, promoviendo un desarrollo más ordenado y sostenible en la región. Este enfoque integral permitirá mejorar la calidad de vida de los habitantes y fortalecer la cultura.

1. INTRODUCTION

In Ecuador, contemporary urban challenges, particularly visible in peripheral parishes such as Calderón in Quito, reveal a lack of adequate planning and excessive growth of informal settlements. These circumstances have fostered residential segregation and fragmentation of the urban fabric, resulting in isolated communities and accentuating existing social inequalities [1]. This phenomenon is part of a broader context of rapid urbanization in Latin America, where the expansion of cities has led to growing social and territorial polarization, negatively impacting the quality of life of residents and restricting their access to basic services [2].

https://doi.org/10.29166/ingenio.v9i1.8778
2025 Universidad Central del Ecuador
CC BY-NC 4.0 —Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional
pISSN 2588-0829
eISSN 2697-3243
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

In April 2016, the province of Manabí, Ecuador suffered an earthquake that severely damaged infrastructure and public spaces [3], among them is the city of Portoviejo, in the Crucita parish, especially its waterfront, which has faced negative impacts due to its vulnerability to flooding, affecting its tourist and commercial activity and hindering urban revitalization. In addition, the current exercise of urban planning and local management has failed to promote sustainable development focused on the most important local aspects, thus limiting the quality of life of its inhabitants.

Over the past 20 years, the parish of Crucita has experienced remarkable urban and demographic growth, which has been a key factor in the transformation of its urban fabric. This growth, however, has been marked by disorderly development and inefficient land use, largely due to the lack of adequate urban planning. This deficiency has triggered a significant deterioration in the urban, spatial, and environmental conditions of the area. As a result of these problems, the parish faces serious socioeconomic challenges that affect the quality of life of its inhabitants. The lack of adequate infrastructure, basic services, and public spaces has contributed to aggravating the situation, creating an environment that limits opportunities for development and well-being for the community.

Currently, the parish of Crucita faces a series of challenges that encompass social, economic, and environmental aspects. These factors have led to a notable deterioration of its urban spaces, resulting in a loss of vitality in the community. Given this situation, it is essential to implement urban strategies that contribute to the creation of a sustainable urban model. This model should be geared toward revitalizing, improving, and humanizing the urban ecosystem, allowing life to flow harmoniously through these spaces. In other words, the goal is to establish an urban support system that is endowed with energy and dynamism, thus promoting the comprehensive development of life in all its dimensions and complexities [4].

The disorderly use of land and lack of planning in activities along the seafront have had a significant impact on the coastal morphology of Crucita. This alteration has negatively affected the image of the area, resulting in a notable decrease in commercial and tourist activity, which, in turn, has repercussions on the local economy and the quality of life of its inhabitants.

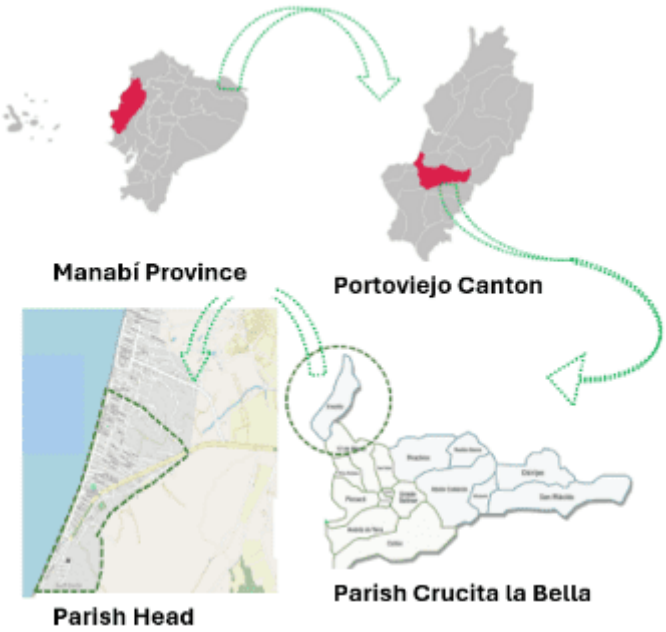
In addition, limited accessibility to the promenade prevents both residents and visitors from fully enjoying this space. The scarcity of green areas also represents a problem, as it reduces opportunities for recreation and leisure, directly affecting the health and well-being of the community. To further complicate the situation, the lack of cartographic information hinders an adequate diagnosis of current conditions, as well as the identification of critical areas that require urgent attention.

The implementation of a sustainable urban model, based on adequate land use planning and geospatial analysis, will improve the resilience of the parish of Crucita to the effects of climate change, revitalizing its tourism and commercial activity and, consequently, increasing the quality of life of its inhabitants. Given this situation, it is essential to propose strategies for a sustainable urban model in the parish of Crucita. This will be achieved through geospatial analysis and the application of Geographic Information Systems (GIS), focusing on urban morphology and structure, as well as social issues that affect the vitality of the locality. The implementation of these urban strategies will seek to improve the quality of life of the inhabitants and promote a dynamic, inclusive, safe and resilient sector.

Crucita, located in the province of Manabí Fig. 2, is only 30 minutes from the cities of Portoviejo and Manta [5], This locality covers an area of 6,228.08 hectares and is located at coordinates 0°52'15.80"S and 80°32'13.52" W. It has a characteristic climate, with a dry summer and a warm and rainy winter season. According to data from the PDOT [5] is bordered to the north by the resorts of San Jacinto and San Clemente of Charapotó parish, to the south by Jaramijó canton, to the east by Charapotó, El Pueblito and Cañitas of Sucre canton, as well as Higuerón of Rocafuerte canton, and to the west by the Pacific Ocean. For the analysis of the work, the study area was delimited, corresponding to the parish headwaters.

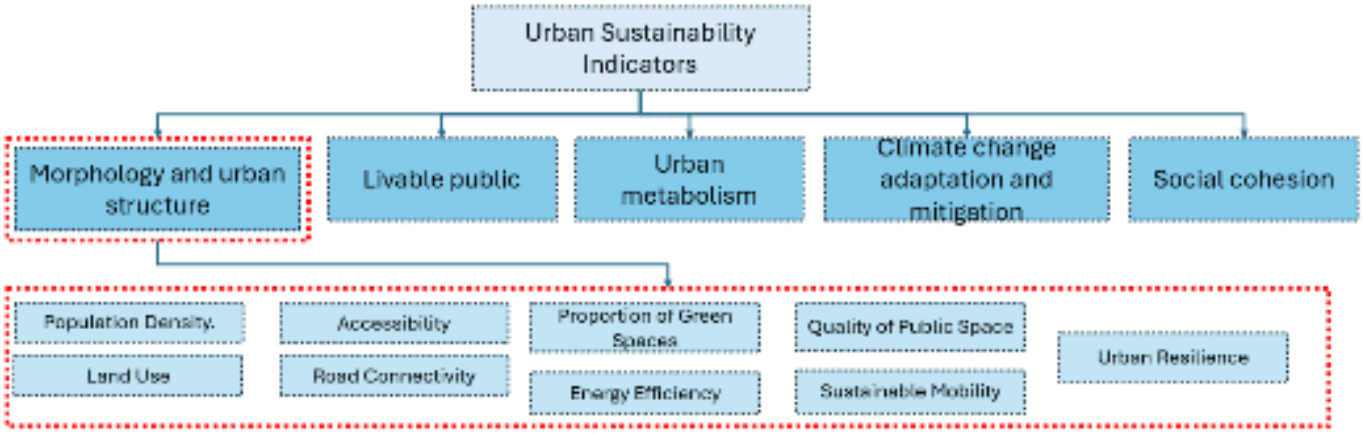
Fig. 1.

Location "Cabecera parroquial de Crucita la Bella".



Therefore, the present study asks: to what extent do urban morphology and urban structure condition sustainability performance in Crucita la Bella? Accordingly, the article aims to: (i) select and normalize a set of territorial indicators aligned with international frameworks [6], [7]; (ii) determine variable weights through a transparent and reproducible procedure; (iii) identify intra-urban typolo-

Fig. 2.
Urban Sustainability Indicators.



Source: [10].

gies through Principal Component Analysis (PCA) and hierarchical clustering; and (iv) derive spatially oriented intervention lines that link the empirical findings with feasible policy and design actions.

Urban sustainability indicators provide an operational bridge between diagnostic evidence and strategic decision-making. Beyond describing the status quo, they capture trends and trade-offs across environmental, social and functional dimensions, enabling comparability over time and space [6], [7], [8], [9]. In coastal and post-disaster contexts, indicator systems are particularly relevant because they reveal spatial inequalities in access, exposure and adaptive capacity, and make visible the territorial conditions that either constrain or enable resilience-oriented planning [6], [7], [9].

Within this indicator family, urban morphology and urban structure are key determinants of sustainability outcomes. Density, land-use mix, street connectivity and block configuration influence accessibility, energy demand, public space quality and the viability of active and public transport [11], [12], [13]. Morphology describes the physical organization and form of the built fabric, while structure relates these forms to functional, social and economic dynamics. Together, they shape the spatial logic through which opportunities, risks and amenities are distributed across the city [11], [12], [13]. Recent studies in Ecuadorian intermediate cities have confirmed the relationship between morphological typologies and habitability levels [13].

In coastal settlements, the interaction between urban form and environmental exposure positions resilience as a central dimension of sustainability. The provision of green areas, microclimatic regulation, and the robustness of circulation networks condition both everyday livability and emergency performance. For this reason, the set of indicators fulfills a dual role: (a) it guides short-term improvements—for example, by generating shade in public spaces, ensuring permeability, and providing safe crossings, among others—and (b) it informs medium-term strategies, such as promoting urban consolidation while guaranteeing access to basic services, as well as planning public-space systems that are properly distributed and accessible, in alignment with international guidelines and references[7], [9], [14], [15].

Given the multiscalar and interdependent nature of these dimensions, multivariate techniques are suited to reduce redundancy, reveal latent patterns and delineate urban typologies. Principal Component Analysis (PCA) synthesizes co-varying indicators into a small set of components, while hierarchical clustering (Ward's method) groups areas with similar profiles, supporting targeted, place-based interventions [13], [16]even though 70% of the world's population lives in urban areas. The Sustainable Development for Energy, Water, and Environment Systems (SDEWES. This analytical pathway connects the indicator framework to an index and to an actionable territorial narrative.

2. METHODS

This research is based on a positivist quantitative methodological approach, which allows the analysis of urban sustainability from measurable, replicable and objective indicators. The design adopted is non-experimental, since the variables will not be directly manipulated, but observed in their real territorial context. Within this framework, a combination of two types of scope is proposed: descriptive, aimed at characterizing the current conditions of the territory, and explanatory, focused on establishing relationships between urban variables and their influence on sustainability.

2.1. DATA COLLECTION

The data collection stage is based on a socio-spatial analysis technique, understood as an approach that allows unders-

tanding the spatial organization of social, environmental and functional phenomena through their cartographic representation. To this end, Geographic Information Systems (GIS) tools will be used to process and represent georeferenced information at different territorial scales.

Primary and secondary data will be integrated into thematic layers, associated to key variables of analysis. These layers will include, among others: administrative boundaries, land use, population density per hectare, road networks and connectivity hierarchies, green spaces (with their classification by type and function), equipment distribution, public transport routes and urban heat generation points. The data source will include municipal cadastres, databases of the National Institute of Statistics and Census (INEC), satellite images (Landsat, Sentinel), OpenStreetMap, and official base cartography.

2.2. PREPARATION OF SPATIAL MAPS

Once the layers have been consolidated, the thematic maps will be produced using software tools such as QGIS 3.28 or ArcGIS Pro, applying geoprocessing functions, spatial overlay, network analysis and distance calculations. Density, accessibility and road connectivity maps will be produced using methods such as Kernel Density Estimation (KDE) for population distribution, cost distance for accessibility, and centrality analysis (closeness and betweenness) to evaluate road hierarchies.

Likewise, an analysis of green coverage will be carried out using the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), which will allow estimating the degree of urban vegetation through the interpretation of multispectral images. The results of these maps will serve as input for the development of the composite indicator of urban sustainability, the central axis of the analysis.

2.3. CONSTRUCTION OF THE URBAN SUSTAINABILITY INDICATOR

The urban sustainability indicator will be developed under a compositional and hierarchical approach, structured around the urban morphology and structure dimension. This indicator will integrate ten main variables, selected for their relevance in international sustainable urban assessment models [7], [16]:

- Population density (inhab/ha)
- Mixed land use (%)
- Accessibility to basic services (average distance to key nodes)
- Road connectivity (nodes and connections per hectare, connectivity index)
- Proportion of green spaces (% of urban area)
- Energy efficiency (consumption intensity per m^2)
- Quality of public space (assessed by presence of furnishings, lighting and maintenance)
- Sustainable mobility (infrastructure for non-motorized transport)
- Urban resilience (capacity to respond to natural and anthropogenic hazards)

Table 1 summarizes the ten indicators selected for constructing the Urban Sustainability Index (USI), detailing their description, units of measurement, data sources, and expected relationship with sustainability performance.

These variables will be normalized using standardization techniques (z-score or min-max), and weighted according to their relative incidence in the theoretical framework and empirical evidence [13], [17]even though 70% of the world's population lives in urban areas. The Sustainable Development for Energy, Water, and Environment Systems (SDEWES. These indicators are aligned with international frameworks but require local calibration to Latin American realities, as demonstrated by the CEDEUS approach in Chile [14] especially since the generation of specific urban indicators for the Agenda 2030. Urban sustainability is a broad concept involving many dimensions, therefore the generation of a short, but comprehensive list of indicators is a significant challenge. In this paper, we present a set of 29 indicators designed to characterise urban sustainability in Chile, which we also expect to be relevant to other cities, particularly in the Global South where issues of poverty and inequality are prevalent. We first outline the process of selecting the indicators through expert consultation. Then we present selected indicators, and the variables used to measure them. Subsequently the set is applied to six Chilean cities that are diverse in terms of population, socio-economic conditions and geography. We show that some indicators highlight negative nationwide trends that are common to the cities, while other indicators reveal notable differences that can be traced back to their local contexts. The CEDEUS indicators provide a complement to the UN's Sustainable Development Goals (SDGs. The integration of these variables into a single index will make it possible to compare intra-urban areas and to evaluate the sustainability of the territory in an aggregated manner.

To determine the relative weight of each variable within the Urban Sustainability Index (USI), a statistical weighting procedure was applied to ensure transparency and reproducibility. Principal Component Analysis (PCA) was first conducted on the normalized dataset to identify latent dimensions of co-variation among indicators. The weights (w_i) were derived from the absolute factor loadings of each variable across the retained components, proportionally adjusted by the variance explained by each component, and normalized so that $\Sigma w_i = 1$. This data-driven approach minimizes subjectivity compared to expert scoring methods.

TABLE I.
Summary of indicators, data sources, and measurement units

Code	Indicator	Description	Unit / Scale	Source	Expected effect (+/–)
V1	Population density	Number of inhabitants per hectare	hab/ha	INEC (2020)	+
V2	Land-use diversity	Degree of functional mix measured through Shannon Index	dimensionless	Field survey, GAD Mejía (2024)	+
V3	Street connectivity	Density of intersections per square kilometer	intersections/ km²	QGIS analysis (2024)	+
V4	Green-space ratio	Proportion of public green areas per inhabitant	m²/hab	QGIS, field verification	+
V5	Accessibility to services	Mean network distance to primary facilities (education, health, commerce)	meters	ArcGIS Pro, OSM data	–
V6	Building coverage index	Percentage of built-up surface over total parcel area	%	Cadastral layer, GAD Mejía (2024)	–
V7	Road condition index	Share of paved vs. unpaved roads	%	Field survey	+
V8	NDVI vegetation index	Normalized Difference Vegetation Index (mean value per block)	dimensionless	Sentinel-2 imagery (ESA, 2024)	+
V9	Public-space provision	Ratio of open spaces suitable for public use	m²/hab	QGIS + fieldwork	+
V10	Proximity to coastline risk	Distance to high-risk coastal exposure areas	meters	MAAE, GAD Mejía (2023)	–

The final index was computed through a linear aggregation model:

$$USI = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot V_i^{norm}$$

where V_i^{norm} represents the standardized value of variable i, and w_i its corresponding weight.

Subsequently, hierarchical cluster analysis (Ward's method, Euclidean distance) was performed using the component scores obtained from the PCA to classify urban sectors with similar sustainability performance. This sequence—PCA followed by clustering—ensures dimensional reduction while preserving the internal structure of the data. The resulting groups form the empirical basis for identifying urban typologies and for spatializing sustainability outcomes across Crucita's territory.

Prior to applying the PCA, correlation tests were performed to verify the absence of redundancy among variables. Sampling adequacy and sphericity were confirmed through the Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) statistic and Bartlett's test of sphericity, ensuring the suitability of the dataset for multivariate analysis. This step guaranteed that the structure of the indicators was statistically consistent and robust for dimensional reduction.

Finally, the calculated USI values and the resulting urban typologies were spatialized in QGIS to visualize intra-parish disparities and identify critical or resilient sectors. Choropleth and cluster maps were generated to facilitate interpretation and to support the formulation of targeted spatial strategies within Crucita's urban fabric.

2.4. DATA ANALYSIS TECHNIQUES

Once the database has been constructed, multivariate analysis techniques will be applied, aimed at identifying behavioral patterns and grouping urban areas with similar characteristics. The main techniques used will be:

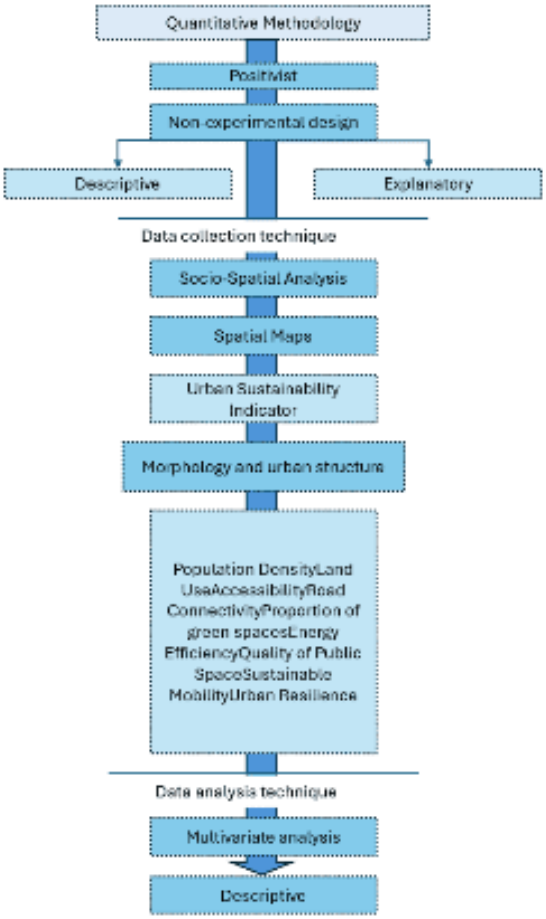
- Principal Component Analysis (PCA): will reduce the dimension of the database, identifying structural axes (components) that explain most of the variance between variables. This will make it easier to visualize the relationships between dimensions and eliminate redundancies.
- Hierarchical Cluster Analysis (Ward's Method): applied to the components extracted by the PCA, it will allow generating urban typologies according to their sustainability performance, grouping similar areas to facilitate their comparison.
- Descriptive Analysis: measures of central tendency, dispersion, box plots and heat maps will be used to visualize the distribution and behavior of each variable, as well as the differences between the clusters generated.

These tools will be applied using IBM SPSS Statistics, RStudio and Excel Power Pivot programs, guaranteeing statistical rigor and ease of representation.

In conclusion, the proposed methodology seeks to provide a rigorous territorial evaluation that, from the spatial and quantitative dimension, allows for an accurate diagnosis of the current conditions of the urban system. In addition, it will make it possible to simulate different transformation scenarios based on the relationship between urban form and sustainability. This approach will facilitate decision-making aimed at planning more equitable, resilient and environmentally sustainable cities, with technical, empirical and territorially contextualized support.

Fig. 3.

Methodology to be used.



3. ANALYSIS AND RESULTS

MULTIVARIATE RESULTS: PRINCIPAL COMPONENT AND CLUSTER ANALYSIS

The multivariate analysis began with a Principal Component Analysis (PCA) applied to the ten standardized sustainability indicators. The KMO test (0.78) and Bartlett's test of sphericity ($p < 0.001$) confirmed the statistical adequacy of the dataset. Three principal components with eigenvalues greater than 1 were retained, explaining 71.4% of the total variance. Component 1 (Density–Connectivity Pattern) concentrated variables associated with population density, road connectivity, and accessibility. Component 2 (Green and Environmental Quality) grouped indicators such as the green-space ratio, NDVI, and distance from coastal exposure. Component 3 (Public Space and Urban Form) integrated land-use diversity, building coverage, and public-space quality. These components summarize the main structural relationships underlying sustainability performance across Crucita's urban fabric.

Based on the PCA scores, a hierarchical cluster analysis (Ward's method, Euclidean distance) was carried out to classify urban sectors according to their sustainability performance. Three clusters were identified, representing distinct morpho-structural typologies: Cluster 1—compact and connected areas with intermediate sustainability values; Cluster 2—peripheral zones with low density and higher environmental quality; and Cluster 3—central consolidated sectors with high density but low environmental indicators. The spatial distribution of these clusters highlights a marked contrast between the coastal front, where environmental exposure is higher, and inland sectors, where accessibility and green-space ratios improve.

Table 2 presents the variance explained by each component and their interpretation.

The following sections detail the spatial behavior of each indicator, providing a descriptive analysis that complements the multivariate findings and supports the formulation of urban strategies.

The study of urban morphology and structure allows us to understand how the territory is organized and spatially configured, and how these forms directly impact the sustainability, quality of life and resilience of communities. To evaluate these aspects in the Crucita parish, an analysis framework has been structured based on key indicators that allow the identification of occupation patterns, access to services, mobility, energy efficiency and adaptation to climate change, among others. These indicators, based on recent methodological proposals such as those of doinGlobal [10], have been adapted to the local context in order to provide a comprehensive view of the urban reality of Crucita.

This set of indicators includes: population density, land use, accessibility, road connectivity, availability of green spaces, energy efficiency, quality of public space, sustainable mobility and urban resilience. Each of these aspects is addressed through socio-spatial analysis supported by thematic mapping, statistical sources and territorial observation, which allows for the precise identification of the weaknesses and potential of the urban system. This approach not only facilitates the technical evaluation of urban sustainability, but also guides planning towards strategies that integrate the principles of territorial equity, sustainable development and spatial justice.

TABLE II.

PCA results: variance explained and interpretation.

Component	Eigenvalue	% Variance	Cumulative %	Interpretation
1	3.45	34.5	34.5	Density–Connectivity Pattern
2	2.15	21.5	56.0	Green and Environmental Quality
3	1.55	15.4	71.4	Public Space and Urban Form

The following is an individualized analysis of each indicator, complemented with empirical evidence, census data and cartographic results, in order to establish a clear diagnosis of the current state of the Crucita parish and generate a technical basis for the formulation of intervention proposals.

3.1. URBAN MORPHOLOGY AND STRUCTURE INDICATORS.

This framework of indicators contains the following items Population Density, Land Use, Accessibility, Road Connectivity, Green Spaces, Energy Efficiency, Quality of Public Space, Sustainable Mobility and Urban Resilience [10], the first indicator to be used to evaluate the indicators in each of the cartographies is the shape of the parish, which will provide a better understanding of the shape of the parish, as well as to evaluate the indicators in each of the cartographies.

3.1.1. Population Density

In 2001, Crucita parish had a population of 11068 inhabitants, which corresponded to 5.89% of the total population of the canton of Portoviejo. In 2010 this population changed to 14050, in terms of proportion with respect to the canton's population, Crucita remains the second most populated rural parish in the canton, as mentioned in the [18]. The population growth rate is the highest in the canton in terms of rural parishes with a growth rate of 2.64% between 2001-2010. It presents a spontaneous and unplanned growth. According to the population pyramid of the rural parish of Crucita, the largest range of the population is young, between 5 and 29 years old, with a total average of 48% as shown in Fig. 4.

TABLE III

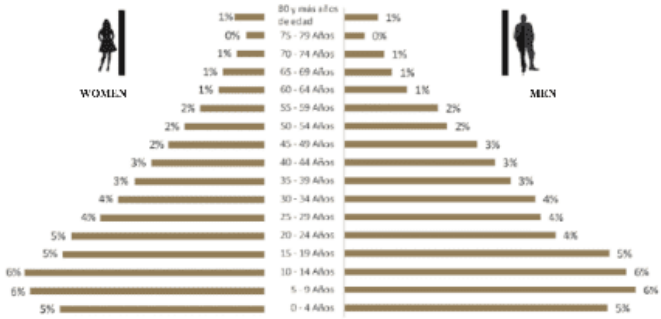
Population growth of the rural parishes of Portoviejo.

PARISH	POPULATION 2001	POPULATION 2010	GROWTH RATE
Calderón	12.511	14.164	1,38 %
Alhajuela	3.285	3.754	1,48 %
Crucita	11.068	14.050	2,65 %
Pueblo Nuevo	2.804	3.169	1,36 %
Río Chico	10.227	11.757	1,55 %
San Plácido	8.039	7.687	-0,50%
Chirijos	2.736	2.362	-1,63 %

Source: [18]

Fig. 4.

Population pyramid.



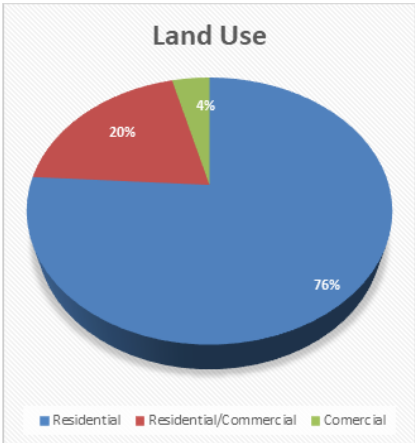
Source: [18]

3.1.2. Land Use

Land use is essential in territorial planning, and in Crucita la Bella, 76% of the land is allocated to residential use, which can limit functional diversity and generate a monotonous urban dynamic. Only 20% is used for commercial activities, concentrated on the coast, which benefits tourism, but lacks a mixed approach to revitalize the area. In addition, only 4% of the land is used for educational institutions and other services, demonstrating the need for diversification. To promote sustainable urban development, it is crucial to integrate mixed uses that include housing, commerce and green areas, as well as to increase the supply of educational and recreational facilities. These strategies would improve the quality of life and social cohesion in the community.

Graph 1.

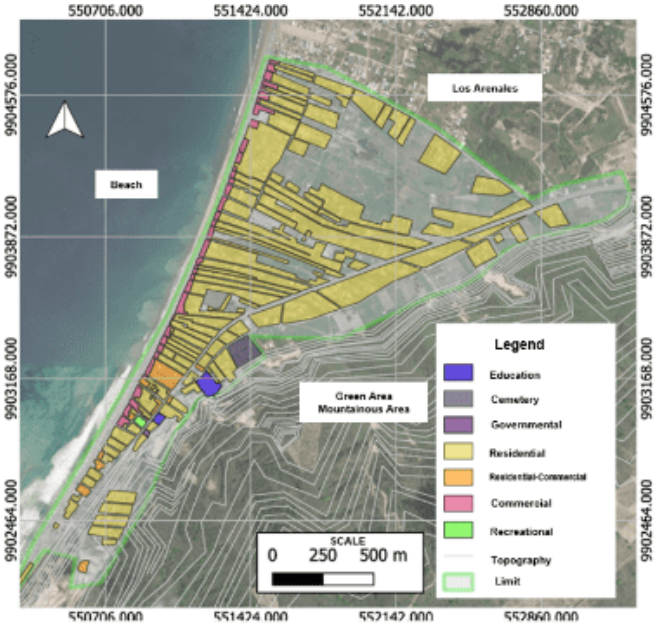
Land Use.



Source: [18]

Map 1.

Land use in the parish seat of Crucita.



3.1.3. Accessibility and Road Connectivity

Accessibility and connectivity are fundamental in urban planning, directly affecting the quality of life of citizens and the sustainability of cities. In Crucita, proximity to essential services such as health, education, and commerce is a significant challenge. The scarcity of these services forces residents to travel long distances, which can negatively impact their well-being, especially in emergencies. Furthermore, the reliance on main roads to access these services highlights the lack of adequate infrastructure in other areas.

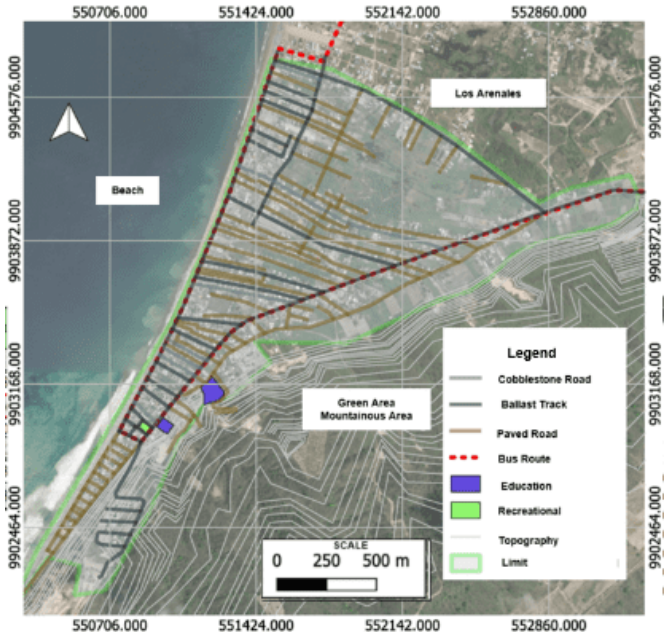
The road infrastructure in Crucita faces numerous problems that limit internal connectivity. Many streets are unpaved or in poor condition, making transit difficult for both vehicles and pedestrians, creating unsafe conditions. The gravel roads can become impassable during rainy seasons, worsening the situation and restricting the mobility of residents. This lack of maintenance and planning perpetuates a cycle of exclusion for those who depend on these routes.

Despite these challenges, access to public spaces such as the boardwalk and the park is relatively good, which is crucial for the social and physical well-being of the residents. However, access to the beach is obstructed by a large breakwater that limits direct connection to the sea, also impacting the region's tourism potential.

In conclusion, the situation regarding accessibility and connectivity in Crucita highlights the urgent need for more comprehensive and sustainable urban planning. To improve the quality of life for citizens, it is vital to address deficiencies in infrastructure, diversify services, and ensure adequate access to public spaces and natural resources. This will not only foster more cohesive and sustainable development but also strengthen the community's resilience to future challenges, promoting a more inclusive and equitable urban environment [15].

Map 2:

Accessibility of the parish head of Crucita.



3.1.4. Green Spaces

The World Health Organization (WHO) establishes that the index of urban green areas should be equal to or greater than 9 m² per inhabitant [19]. In the case of the parish of Crucita, according to the INEC of 2010, the population is 14,050 inhabitants and the total area is 6,228.08 hectares. This results in an urban green index of 2.26 m² per inhabitant [5]. This data reveals a significant deficit of green spaces that contribute to the comfort and environmental quality of the urban surroundings. Therefore, the use of vacant lots for green areas, along with reforestation using native species, becomes a priority. Such interventions have been promoted, for example, in national urban projects as mentioned by Cevallos, Álvarez & Almeida [20] in the article "University-Community Linkage for Sustainable Development: A Case Study in Miranda Mirador Sur".

The map of green and recreational areas in the parish head of Crucita reveals a concerning situation regarding the availability of spaces for recreation and connection with nature. Currently, there is only one recreational area, which is a park, in addition to a mountainous zone that, although it contributes vegetation, does not compensate for the scarcity of accessible green areas for the community. This limitation in green infrastructure not only affects the aesthetics of the urban landscape but also has direct implications on the quality of life of the inhabitants. The lack of adequate green areas limits opportunities for recreational and leisure activities, which are essential for the physical and mental well-being of citizens.

Green spaces are crucial for fostering social cohesion, as they provide places where people can gather, interact, and participate in community activities. The scarcity of these spaces can also contribute to an increase in public health issues, such as stress and obesity, by limiting options for outdoor exercise and connection with nature.

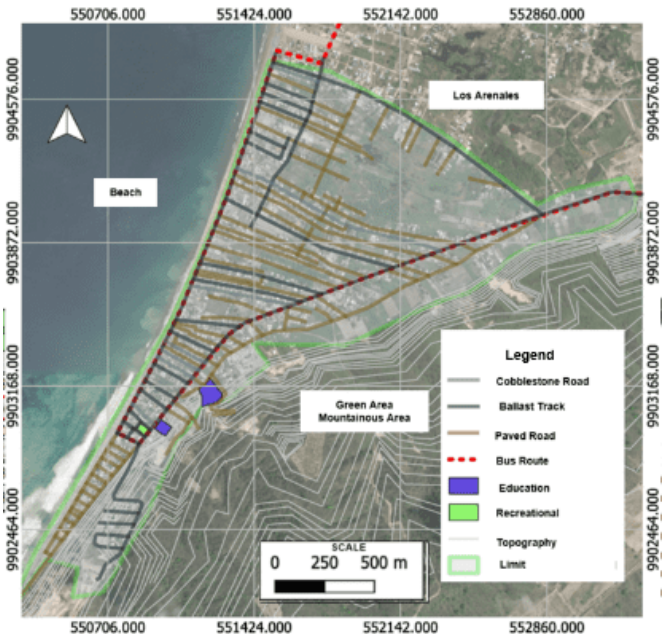
Furthermore, the large percentage of vacant land in the area represents a missed opportunity for the development of green spaces that could transform the urban landscape. Repurposing these lands to create parks, community gardens, or recreational areas would not only beautify the area but also improve residents' quality of life by providing them with access to natural spaces.

The incorporation of native species and reforestation in Crucita are essential to mitigate the effects of heat and improve air quality. Native species are adapted to the local climate and require fewer resources to maintain, making them a sustainable option for creating green spaces. Planting trees and creating shaded areas not only contributes to the aesthetics of the urban landscape but also helps regulate temperature, providing much-needed relief during the hottest months.

In summary, the current situation of green and recreational areas in Crucita underscores the urgent need to implement strategies that promote the creation and maintenance of these spaces. Reforestation, the incorporation of native species, and the reuse of vacant lots are essential steps to improve the urban landscape and the quality of life for residents. By investing in green areas, Crucita will not only benefit from a healthier and more aesthetically pleasing environment but will also move towards more sustainable and resilient development, fostering a more united community that is aware of its surroundings.

Map 3:

Green spaces in the parish seat of Crucita.



3.1.5. Energy Efficiency

Energy efficiency in the parish head of Crucita is prominent, highlighting a growing commitment to sustainability and reducing environmental impact. Currently, most residents have access to efficient energy solutions, resulting in relatively low energy consumption. This is made possible by the implementation of strategies and technologies aimed at the rational use of energy.

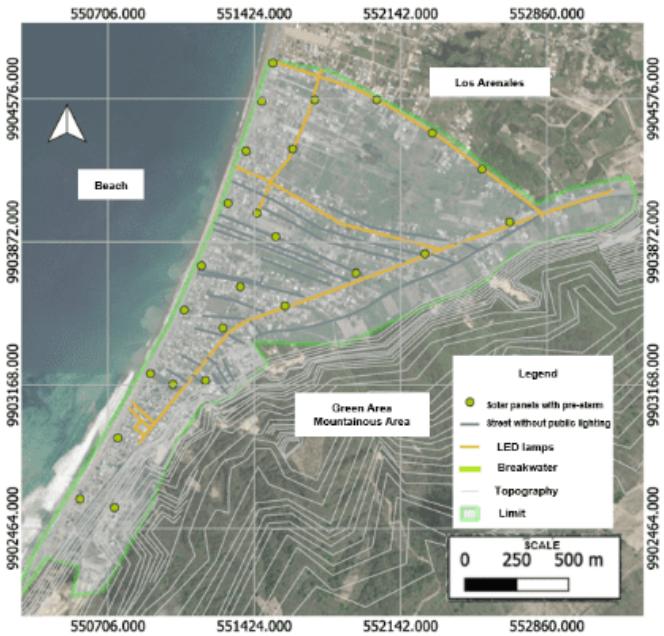
The use of renewable energies, especially solar energy, has become widespread, reducing dependence on non-renewable sources and contributing to lower energy costs. Meanwhile, the modernization of public lighting infrastructure to LED has been a key step in improving efficiency, decreasing energy consumption and greenhouse gas emissions.

For the parish seat of Crucita, it is essential to adopt sustainable construction practices that not only improve the energy efficiency of homes but also enhance their comfort and functionality. These measures, along with growing environmental awareness in the community, will make Crucita a model of energy efficiency in the region.

However, challenges remain, such as the need to increase awareness about energy savings and promote a broader shift toward responsible consumption practices. Despite this, the current scenario presents a unique opportunity to consolidate a sustainable and resilient urban development model that maximizes renewable energy and strengthens the quality of life of its residents.

Map 4:

Energy Efficiency of the parish seat of Crucita.



3.1.6. Quality of public space

Public space in the parish head of Crucita faces several issues that affect the quality of life for its residents and the experience of visitors. This space is not limited

to a park or recreational area; it includes the boardwalk, streets, and sidewalks, forming the circulation system of the area. A critical aspect is the condition of the roads, which are mostly unpaved and dusty, hindering mobility and causing inconveniences both in dry seasons and during rains. The lack of proper paving compromises road and pedestrian safety, obstructing sustainable urban development.

The boardwalk, one of Crucita's main attractions, shows evident deterioration, affected by tidal waves and the wear of time, which limits its use and appeal as a tourist space. Additionally, the breakwater has given way over the years, making beach access difficult. Although residents have improvised steps, the lack of proper infrastructure remains a functional and aesthetic challenge.

Another issue is the scarcity of urban furniture. The lack of benches and adequate resting areas has led the community to use logs as makeshift solutions, which are unappealing and do not provide comfort or accessibility. The existing furniture is in poor condition, which diminishes the quality of the urban environment and affects the user experience.

The lack of vegetation is a critical factor. The absence of trees and plants limits the creation of shaded areas, reducing thermal comfort and environmental sustainability in the beach and its surroundings. Vegetation is essential for improving user well-being and preserving ecological balance, and its scarcity affects biodiversity and urban climate. It is urgent to address these issues to improve the quality of public space in Crucita. An integrated intervention that includes the improvement of road infrastructure, the rehabilitation of the boardwalk, the creation of adequate urban furniture, and the incorporation of vegetation is essential to transform the parish into a more accessible and sustainable place. These actions would not only enhance the quality of life for residents but also boost the tourist appeal of Crucita, favoring its economic and social development.

3.1.7. Sustainable mobility

Sustainable mobility has become an essential aspect for improving the quality of life in the parish head of Crucita. This concept advocates for a transportation model that is accessible, efficient, economical, and environmentally friendly, aiming to create a healthier and more dynamic urban environment. In an area like Crucita, characterized by its growing population and influx of tourists, promoting sustainable mobility not only enhances the quality of life for residents but also strengthens economic development and social cohesion.

Currently, the road infrastructure in Crucita faces challenges that affect the mobility of its inhabitants. Many of its streets are unpaved and dusty, which complicates not only vehicle circulation but also the transit of pedestrians and cyclists, especially during the rainy season. The lack of adequate sidewalks and limited road

Map 5:

Quality of Public Space in the parish seat of Crucita.

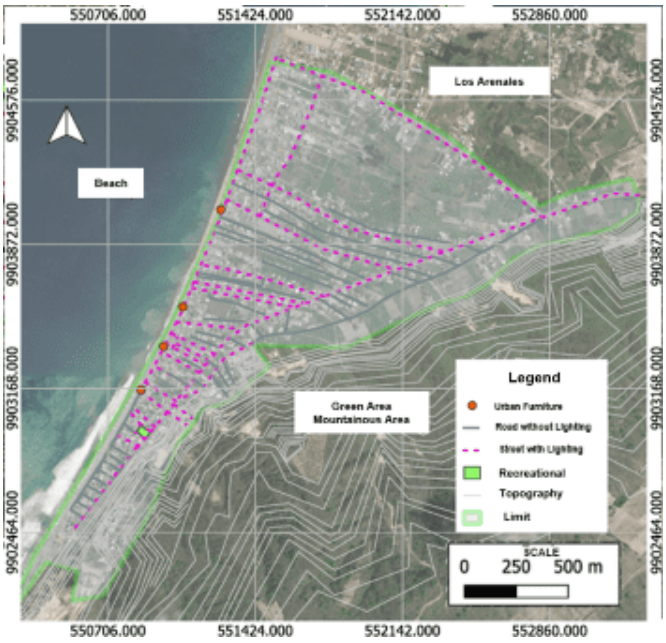


Fig. 5.

Photographic evidence of the public space.

signage complicate pedestrian safety, encouraging the use of private vehicles and contributing to traffic congestion. Moreover, public transportation is limited and does not efficiently meet the community's needs, increasing dependence on personal cars and, consequently, traffic and pollution problems.

However, there are numerous opportunities to promote more sustainable transportation alternatives in Crucita. One of the first actions would be the construction of adequate and safe sidewalks for pedestrians, which

would not only facilitate their movement but also be inclusive and accessible for people with reduced mobility. Additionally, the creation of exclusive bike lanes would encourage the use of bicycles as a means of transportation, which would not only reduce traffic congestion but also improve public health by promoting physical activity.

Another fundamental measure is the improvement of public transportation, which must be efficient, accessible, and affordable for the residents of Crucita. This could involve implementing a broader and more modern public transport network, with low environmental impact vehicles, such as electric or hybrid buses, that contribute to reducing pollution and noise in the area. Furthermore, restructuring routes and schedules would allow for more efficient coverage, facilitating citizens' access to various points in the parish without the need to rely on private cars.

The integration of green spaces along mobility routes is crucial for improving the aesthetics and functionality of urban infrastructure. Incorporating gardens, trees, and green areas not only beautifies the environment but also provides shade and improves air quality, especially in high-traffic areas. Trees act as thermal regulators, creating a more comfortable environment for pedestrians and cyclists.

The use of geographic information systems helps strengthen these strategies by allowing the design of optimal and accessible routes for different modes of transportation. This tool has proven to be effective in similar scenarios, such as in the parish of Calderón, where it was key in identifying connection opportunities between neighborhoods through more efficient transport networks [21].

Promoting active mobility, such as walking and cycling, and raising awareness of its environmental, economic, and health benefits can lead Crucita towards a more accessible and sustainable urban environment. Additionally, reducing dependence on private cars would help decrease emissions of harmful gases, which is essential for mitigating the effects of climate change and improving the urban resilience of the parish.

In conclusion, the implementation of sustainable mobility strategies in Crucita would not only facilitate more efficient and safe movement for residents but also contribute to creating a more cohesive community, aware of its environmental impact and willing to adopt practices that favor its well-being. Improving road infrastructure, strengthening public transport, and creating green spaces are key elements that, when integrated coherently, will transform Crucita into a model of urban sustainability and responsible mobility (See annex map 6).

3.1.8. Urban Resilience

Urban resilience refers to a community's ability to anticipate, prepare for, respond to, and recover effectively from adverse events such as natural disasters, economic crises, or social transformations [22]socioeconomic, and political uncertainty and risk has captured the attention of academics and decision makers across disciplines, sectors, and scales. Resilience has become an important goal for cities, particularly in the face of climate change. Urban areas house the majority of the world's population, and, in addition to functioning as nodes of resource consumption and as sites for innovation, have become laboratories for resilience, both in theory and in practice. This paper reviews the scholarly literature on urban resilience and concludes that the term has not been well defined. Existing definitions are inconsistent and underdeveloped with respect to incorporation of crucial concepts found in both resilience theory and urban theory. Based on this literature review, and aided by bibliometric analysis, the paper identifies six conceptual tensions fundamental to urban resilience: (1. In the parish head of Crucita, this concept is of crucial relevance, given that the locality faces significant challenges such as infrastructure deterioration, climate change, and tsunami alerts.

Crucita has implemented early warning systems designed to notify the population in cases of natural disasters like earthquakes or tsunamis. These alarms are tested frequently, every two days, to ensure their effectiveness. However, there is a considerable challenge: the dispersion and unequal accessibility to designated meeting points. Not all residents have immediate access to these designated shelters, which can put vulnerable sectors of the population at risk. Therefore, it is crucial to increase the number of elevated refuge points and design more accessible evacuation routes, ensuring that all sectors of the community can reach them quickly and safely.

The breakwater in Crucita plays a key role in safety, serving as a physical barrier against wave action and natural phenomena. However, this approach could be complemented by the creation of a coastal green barrier, using native vegetation that would not only act as a buffer against wave impact but also help protect biodiversity and prevent coastal erosion. This integrated approach strengthens both environmental protection and resilience against climate change.

The incorporation of efficient technologies in homes, such as the installation of solar energy systems and the adoption of sustainable building practices, is essential for optimizing resource use in the community. These measures not only reduce dependence on the electrical grid during emergencies but also improve the quality of life for residents by lowering energy costs and ensuring the operational continuity of homes after a natural disaster. It is important that buildings are designed with coastal climate resilience in mind, using appropriate materials that reduce long-term vulnerability.

Improving the road infrastructure in Crucita is another fundamental pillar for strengthening its resilience. Having well-connected and well-maintained evacuation routes ensures that the population can efficiently move to safety points in emergency situations. This includes not only the expansion of existing roads but also the creation of alternative paths that allow for agile evacuation, even under adverse conditions.

Fostering a culture of sustainability and preparedness within the community is essential. This involves educating residents about the importance of sustainable practices, such as reducing energy consumption and using renewable sources, as well as training them in evacuation protocols and disaster response. Additionally, community initiatives should be strengthened to promote collaboration among residents for the protection and maintenance of shared spaces.

Crucita has the potential to become a model of sustainable urban resilience, where the community, environment, and infrastructure align to successfully face the challenges of the present and future. Implementing these strategies will not only ensure the safety and well-being of its inhabitants but also consolidate Crucita as a prepared and sustainable parish in the face of any adversity (See annex map 7).

In summary, the combination of PCA and cluster analysis allowed the identification of three coherent urban typologies that integrate morphological, environmental, and structural dimensions. These typologies constitute the empirical foundation for the intervention strategies proposed in the next section.

3.2. PROPOSAL

The parish seat of Crucita has been selected due to its significant loss of vitality, resulting from abandonment and a decrease in tourism and commercial activity, currently making it one of the weakest urban areas. Therefore, the recovery of public space is projected through the reorganization of the road layout and the pedestrianization of strategic sections. Additionally, green circuits will be promoted to connect the boardwalk with key points in the parish center, aiming to energize and revitalize the area.

In this context, a comprehensive intervention is anticipated, which will include the zoning of urban intervention polygons as general strategies. This intervention will focus on improving sustainability indicators within the morphology and urban structure, covering aspects such as population density, land use, accessibility, road connectivity, the proportion of green spaces, energy efficiency, the quality of public space, and sustainable mobility.

It is proposed to regulate population density to avoid disorderly growth, optimize land use through a plan that considers residential, commercial, and recreational areas, and improve access to services through public transport routes and pedestrian pathways. Furthermore, the aim is to strengthen the road network, increase the number of green spaces to enhance quality of life, promote energy efficiency in buildings, and boost urban resilience. These actions will be strategically integrated to ensure sustainable and balanced development in the parish.

The implementation of the proposed strategies is conceived in three progressive stages to ensure feasibility and monitoring. Short-term actions (0–6 months) prioritize low-cost, high-impact interventions such as shade generation, sidewalk recovery, and public-space maintenance. Medium-term actions (6–18 months) include the construction of green corridors, pedestrian circuits, and the rehabilitation of the waterfront promenade. Long-term actions (18–36 months) aim to consolidate the sustainability network through the integration of complementary facilities, tree planting programs, and continuous community participation mechanisms.

3.2.1. Zoning of intervention polygons

The territory of the parish head of Crucita is characterized by its longitudinal extension, which allows for a diversity of land uses ranging from residential areas to commercial, recreational, and service zones. This geographical configuration poses a significant challenge in terms of urban planning and management, as the distribution and utilization of natural resources must be managed efficiently to ensure harmonious and sustainable development (See annex map 8).

In order to organize this territory coherently, the implementation of a zoning of action polygons is projected. This zoning aims to strategically cover the entire territory of Crucita, ensuring that urban growth occurs in an orderly and controlled manner, respecting the characteristics of the place and the needs of the community. The subdivision into action polygons will allow for detailed planning, adapted to the particularities of each zone, facilitating the implementation of adequate infrastructures and services, such as road networks, access to basic services, public facilities, and green areas.

Furthermore, the zoning of action polygons aims to promote organized population settlements, favoring the development of neighborhoods and sectors that grow efficiently and sustainably over time. This type of planning not only responds to the need for growth but also facilitates access to services and resources for residents, optimizing their distribution based on population density and future projections. The idea is that as the population of Crucita grows, settlements will densify in a controlled manner, integrating new urban developments without compromising quality of life or environmental balance.

In summary, the zoning of action polygons in Crucita is not only a technical tool for organizing space but also a strategy for sustainable development that seeks to balance urban growth with respect for the natural environment and the quality of life of its inhabitants. The gradual and organized densification of the territory will ensure urban development that adapts to the needs of the community, promoting a more accessible, functional, and resilient environment for future generations.

3.3. RESILIENT PROPOSAL

The parish head of Crucita needs a comprehensive strategy to address the challenges of climate change and improve the resilience of its community (See annex map 9). Below are several key initiatives:

- Curved Breakwater: The construction of a curved breakwater on the coast will help protect the parish from erosion and flooding. This structure will not only reduce the impact of waves but also facilitate sediment accumulation, contributing to the stability of the coastline.
- Green Barriers: Implementing green barriers, such as hedges of native vegetation, will help decrease the forces of currents during floods. These barriers will act as a natural buffer, reducing water velocity and protecting inhabited areas.
- Creation of Meeting Points: The proposal includes the creation of two additional strategic meeting points to cover a larger population in case of emergencies. These spaces will be designed to be accessible and safe, facilitating the evacuation and sheltering of residents.
- Camps at Meeting Points: The meeting points will be equipped with temporary camps to accommodate the majority of the population during emergencies. These camps will be stocked with basic supplies, medical care, and psychological support.
- Strategic Parks with Shelters: The creation of strategic parks that include shelters designed for post-disaster use will be planned. These shelters will provide a safe place for residents and will be equipped with resources to facilitate recovery.
- Use of Solar Panels: Solar panels will be integrated into the shelters and meeting points, ensuring energy supply during emergencies. This renewable energy source will not only support the operation of the shelters but also promote environmental sustainability.
- This comprehensive proposal seeks to strengthen the resilience of the parish head of Crucita, ensuring that the community is better prepared to face future disasters and emergencies.

The implementation of these actions requires coordinated participation among multiple actors. The Municipal Autonomous Government of Mejía (GAD Mejía) will lead infrastructure execution and maintenance, while the Universidad UTE will provide academic and technical support through student–community collaboration programs. Community organizations will play a key role in local stewardship, awareness campaigns, and environmental monitoring. Financial resources are expected from a combination of municipal budgets, private sponsorships, and academic extension projects.

3.4. PROPOSED LOCATION OF EQUIPMENT

The aim is to establish facilities to reactivate the economy and tourism in the parish head of Crucita. This initiative focuses on creating recreational spaces that will include vegetation, recreational areas, and leisure zones. These spaces will be complemented by commercial plazas, promoting trade in areas that currently lack such activities and improving accessibility for residents and visitors (See annex map 10).

Additionally, municipal parking lots will be implemented to prevent tourist vehicles from parking on the boardwalk, which would create traffic and congestion. By offering adequate parking points, it will be easier for both the local population and tourists to enjoy the boardwalk in a more comfortable and safe manner.

A key proposal is the creation of a bike path that will be surrounded by tree vegetation, making the cycling experience more pleasant and attractive. This bike path will connect all the parks, promoting an active and healthy lifestyle while enhancing the recreational experience for visitors.

With these actions, the aim is not only to revitalize the local economy but also to transform Crucita into a more accessible and sustainable tourist destination, where the community and visitors can enjoy an enriched natural and recreational environment.

The expected outcomes of the proposal will be evaluated through measurable indicators aligned with the Urban Sustainability Index (USI) dimensions. Key monitoring metrics include: (i) increase in public green-space provision from 2.3 m^2/hab to 9 m^2/hab; (ii) 25 % improvement in road connectivity index; (iii) reduction in average pedestrian travel time to essential services by 20 %; and (iv) annual increase of 15 % in community participation in environmental activities. These indicators provide a quantitative framework to monitor the medium-term impacts of the proposed interventions.

4. CONCLUSIONS

The study confirmed that urban morphology and structure significantly condition the sustainability performance of Crucita la Bella. Compactness, connectivity, and functional diversity emerged as determining variables influencing environmental quality, accessibility, and resilience.

The evaluation of urban sustainability in the parish head of Crucita la Bella has allowed for the construction of a comprehensive diagnosis of the current state of the territory, revealing both strengths and structural weaknesses that condition its development. Through a methodological approach based on the analysis of indicators related to urban morphology and structure, it has been possible to clearly identify the critical variables that limit the consolidation of a sustainable urban model, as well as those that present a high potential for being integrated into intervention strategies. This chapter elaborates in detail on the main conclusions reached throughout the study, highlighting their relevance in technical, social, and territorial terms, of which will be presented in the following points:

4.1. STRUCTURAL DEFICIT AND TERRITORIAL OPPORTUNITIES

The results of the analysis reveal a significant deficit in several key indicators, including: accessibility to services, road connectivity, coverage of green spaces, quality of public space, and land use management. This deficit is reflected in a fragmented territorial organization, precarious physical infrastructure, and a low supply of basic urban services, especially in peripheral sectors and high-density areas. However, clear opportunities were also identified to reverse this situation: the existence of underutilized vacant lots, coastal landscape heritage, the presence of facilities with potential for reactivation, and a local community with growing environmental awareness and participation in neighborhood improvement processes.

These opportunities, if articulated through planned interventions, could become catalysts for urban revitalization processes and improvements in quality of life. These findings provided the empirical foundation for the spatial strategies proposed in the subsequent chapter, ensuring that each intervention directly responds to the identified structural gaps.

4.2. STRENGTHENING URBAN RESILIENCE

Urban resilience has been one of the indicators with the greatest potential in Crucita, especially due to the existence of early warning systems and the progressive adaptation to coastal risks such as tsunamis. However, there is a clear need to strengthen this resilience through more comprehensive and adaptive infrastructures. The implementation of elevated shelters with guaranteed access from all sectors, passive energy systems (such as solar panels on community buildings), and a network of clearly identified and accessible evacuation routes is proposed.

Furthermore, the use of coastal green barriers through native vegetation would not only help mitigate the effects of waves and erosion but also contribute to the ecological balance and landscape value of the coastline. These strategies should be accompanied by community training campaigns in risk management, consolidating a resilience approach centered on people and the territory.

Beyond physical infrastructure, strengthening resilience also requires institutional coordination and continuous community participation. Establishing local committees for risk prevention and integrating these processes into municipal planning instruments will ensure the long-term sustainability of the proposed measures.

4.3. CONSOLIDATION OF SUSTAINABLE MOBILITY

Another of the identified strategic pillars is sustainable mobility. The current state of the roads, mostly unpaved and poorly maintained, seriously limits connectivity, accessibility, and road safety. The scarcity of efficient public transport, pedestrian sidewalks, and bike lanes reinforces dependence on private vehicles, exacerbating problems of pollution, congestion, and territorial inequality.

To reverse this scenario, the development of an active mobility network based on bike paths and safe pedestrian routes connected to community points of interest and essential facilities is proposed. This network should be complemented by a public transportation system with greater coverage, frequency, and accessibility, ideally based on low-impact electric vehicles. The implementation of these measures will contribute to a healthier, more equitable city that is resilient to climate change. In addition to improving physical connectivity, promoting sustainable mobility reduces carbon emissions and contributes to social inclusion, allowing equitable access to opportunities and public services.

4.4. EXPANSION AND INTEGRATION OF GREEN SPACES

The current coverage of green spaces in Crucita is well below the standards recommended by the WHO, directly affecting environmental quality, public health, and social cohesion. The lack of parks, shaded areas, urban vegetation, and recreational spaces represents a critical deficiency that particularly impacts vulnerable populations such as children, the elderly, and women.

The diagnosis proposes strategies to expand these spaces through the recovery of vacant lots, the creation of linear parks and pocket plazas, and the integration of native species to ensure environmentally sustainable management. These spaces should be designed with criteria of inclusion, universal accessibility, and multifunctionality, so that they respond to the diverse needs of the population and serve as nodes for social interaction, environmental education, and climate resilience.

Expanding the green infrastructure network not only enhances ecological balance and urban comfort but also increases the city's capacity to absorb environmental shocks and provide everyday benefits in terms of thermal regulation and well-being.

4.5. DIVERSIFICATION AND MIXING OF LAND USES

Land use in Crucita shows a clear predominance of residential areas, with very little presence of commercial, cultural, or institutional activities. This mono-functionality has led to monotonous urban dynamics, dependence on other parishes for basic services, and low utilization of urban space. The proposal developed here suggests a functional diversification through the gradual incorporation of mixed uses: housing, commerce, services, recreation, and compatible productive spaces.

This type of planning allows for the consolidation of compact, polycentric, and efficient communities, where distances between home, work, and leisure are shorter,

promoting greater urban vitality. The mixing of uses also stimulates the local economy and reduces unnecessary travel, contributing to a more sustainable city with a better quality of life.

This approach directly aligns with the PCA results, which demonstrated that mixed-use and connected areas exhibited the highest composite sustainability scores, confirming the effectiveness of integrated urban morphologies.

4.6. METHODOLOGICAL CONTRIBUTION AND REPLICABILITY

Finally, this study not only provides a technical-territorial proposal for Crucita but also constitutes a relevant methodological contribution. The combination of spatial analysis using GIS, composite indicators of urban sustainability, and multivariate analysis techniques allows for the development of precise territorial diagnoses based on empirical data and adaptable to other contexts.

Moreover, the linkage of this diagnosis with concrete territorial intervention proposals, along with community involvement as a transversal axis of the analysis, demonstrates that it is possible to build more participatory, rigorous, and sustainable planning models. This experience can be replicated in other coastal locations in Ecuador or Latin America that face similar issues of unplanned growth, climate vulnerability, and social fragmentation.

The articulation between quantitative evidence and spatial design represents a replicable model for diagnosing and improving sustainability in other small and medium-sized coastal settlements. This approach fosters evidence-based decision-making and strengthens academic–institutional collaboration as a key mechanism for sustainable territorial governance.

Ultimately, sustainability in small coastal cities depends not only on physical transformations but also on governance, participation, and the capacity to integrate social and spatial dimensions. The case of Crucita la Bella illustrates how an integrative, data-supported, and participatory approach can guide the transition toward more resilient and inclusive urban systems.

REFERENCES

[1] J. L. Álvarez Ochoa, "Barreras invisibles del territorio: segregación residencial socioespacial multitemporal de la parroquia Calderón," *Eídos*, vol. 13, no. 18, pp. 97–107, 2021.

[2] UN-Habitat, "World Cities Report 2016: Urbanization and Development - Emerging Futures," Nairobi, Kenya. [Online]. Available: https://unhabitat.org/world-cities-report-2016

[3] IGEPN, "Informe Sísmico Especial N. 18 - 2016 - Instituto Geofísico - EPN," May 2016. [Online]. Available: http://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1324-informe-sismico-especial-n-18-2016

[4] J. Casariego Ramírez, *La construcción del Espacio Turístico*. San Bartolomé de Tirajana, Canarias: Exploraciones EX2, 2002.

[5] GADM del cantón Portoviejo, "Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Portoviejo," Portoviejo, Manabí, Mar. 2016.

[6] M. E. Pesántez-Yépez and N. E. Cabrera-Jara, "Produciendo periferias: morfología y habitabilidad en las conurbaciones de Cuenca, Ecuador," *Urbano*, vol. 27, no. 49, pp. 78–93, May 2024, doi: https://doi.org/10.22320/07183607.2024.27.49.06.

[7] UN-Habitat, "World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization," Nairobi, Kenya, 2020. [Online]. Available: https://unhabitat.org/world-cities-report-2020-the-value-of-sustainable-urbanization

[8] V. S. Torres López, "Construcción de un sistema de indicadores de sostenibilidad urbana: estudio de caso Santo Domingo de los Colorados.," M.S. Thesis, FLACSO, Quito, Ecuador, 2015. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/10469/7187

[9] V. Klotchkov, "Estructura urbana y ambiente," *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 27, no. 1, pp. 3–10, Jan. 2004, doi: https://doi.org/10.15359/rca.27-1.1.

[10] doinGlobal, "Indicadores de sostenibilidad urbana: claves para el equilibrio ecosistémico," Make the world a better place. [Online]. Available: https://doinglobal.com/qu-son-los-indicadores-de-sostenibilidad-urbana/

[11] OECD, "Green Growth Indicators 2017," OECD Publishing, Paris, Jun. 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1787/9789264268586-en

[12] W. A. Aponte Rodríguez, "Morfología urbana de Madrid, Cundinamarca," *Perspectiva Geográfica*, vol. 16, pp. 211–232, 2011, doi: https://doi.org/10.19053/01233769.1756.

[13] A. Altamirano-Avila and M. Martínez, "Urban sustainability assessment of five Latin American cities by using SDEWES index," *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, p. 125495, Mar. 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125495.

[14] S. Steiniger *et al.*, "Localising urban sustainability indicators: The CEDEUS indicator set, and lessons from an expert-driven process," *Cities*, vol. 101, p. 102683, Jun. 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102683.

[15] D. Banister, "The sustainable mobility paradigm," *Transport Policy*, vol. 15, no. 2, pp. 73–80, Mar. 2008, doi: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005.

[16] R. Eales, O. White, R. Saudaskis, C. Heeckt, and I. Pereira Martins, "Urban sustainability in Europe: a stakeholder-led process," European Environment Agency, Copenhagen, DK, Monograph, Oct. 2021. [Online]. Available: https://www.eea.europa.eu/publications/urban-sustainability-in-europe-a

[17] J. F. Hair Jr., W. C. Black, B. J. Babin, and R. E. Anderson, *Multivariate data analysis*, Eighth. Andover, Hampshire: Cengage Learning (EMEA), 2019.

[18] GAD parroquial de Crucita, "Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Parroquia Crucita 2015," 2015.

[19] World Health Organization, "Urban green spaces: a brief for action," WHO. Regional Office for Europe, Copenhagen, DK, Oct. 2017. Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289052498?utm_source=chatgpt.com

[20] F. S. Cevallos Gangotena, J. L. Álvarez Ochoa, and F. J. Almeida Navarrete, "Vinculación Universidad Y Comunidad: Guía de Intervención Para El Desarrollo Sostenible En Proyectos Urbano-Arquitectónicos. Caso de Estudio: Miranda Mirador Sur, Quito," *Eídos*, vol. 18, no. 25, pp. 25–45, Jan. 2025, doi: https://doi.org/10.29019/eidos.v18i25.1467.

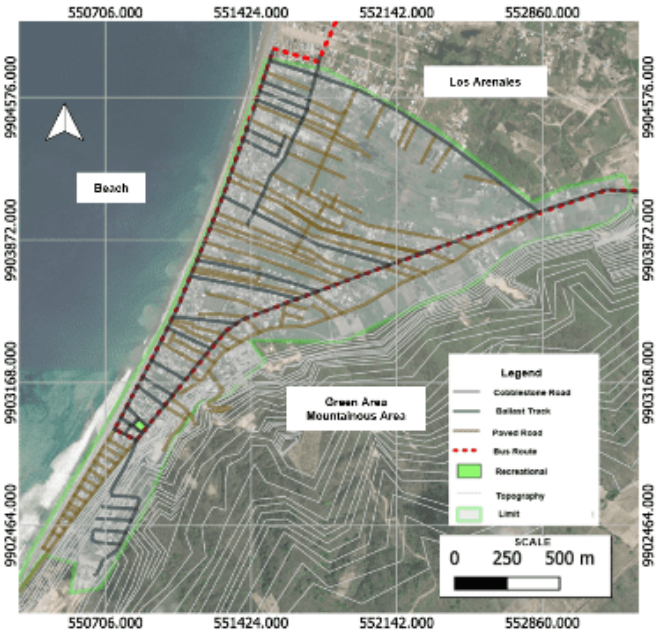
[21] P. Granja Alencastro and J. Álvarez Ochoa, "Un Calderón accesible; rutas de transporte urbano para la Parroquia de Calderón a través de SIG's," *Eídos*, no. 11, Jun. 2018, doi: https://doi.org/10.29019/eidos.v0i11.419.

[22] S. Meerow, J. P. Newell, and M. Stults, "Defining urban resilience: A review," *Landscape and Urban Planning*, vol. 147, pp. 38–49, Mar. 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011.

ANNEXES

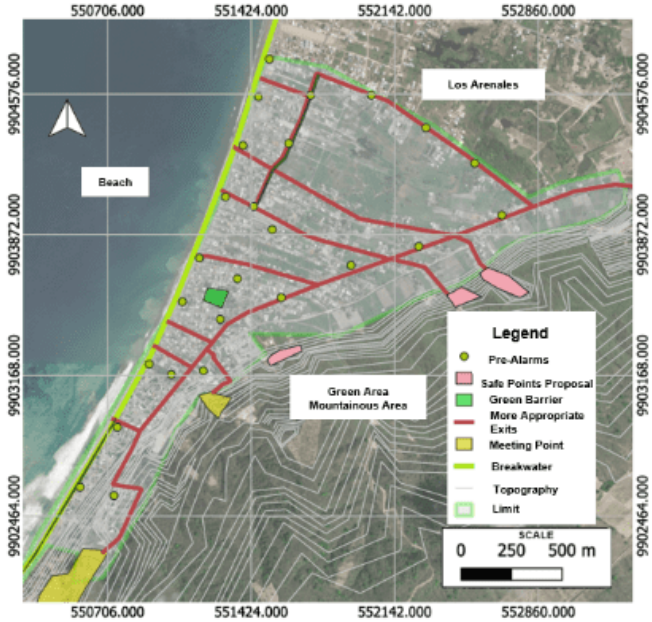
Map 6:

Sustainable Mobility in the parish seat of Crucita.



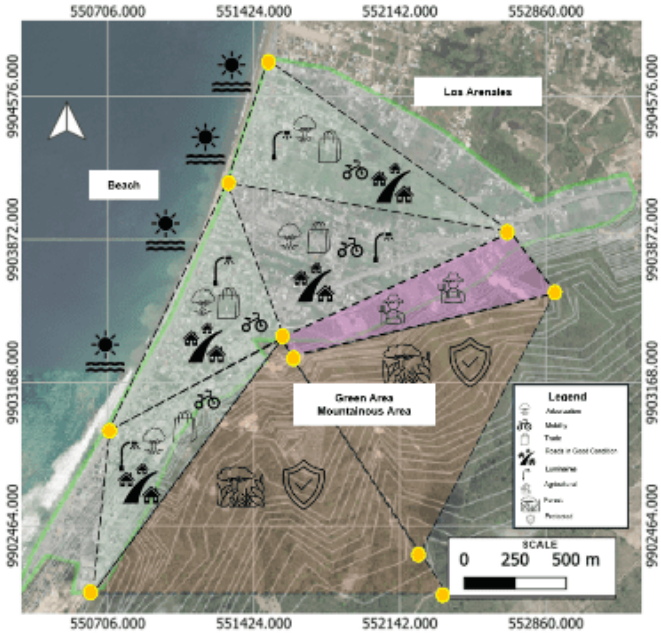
Map 7:

Urban Resilience of the parish seat of Crucita.



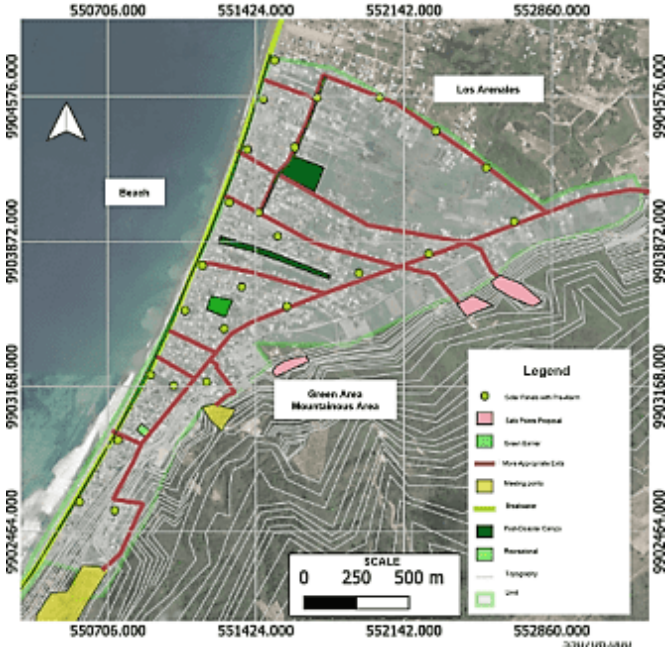
Map 8:

Proposed zoning of polygons in the parish seat of Crucita.



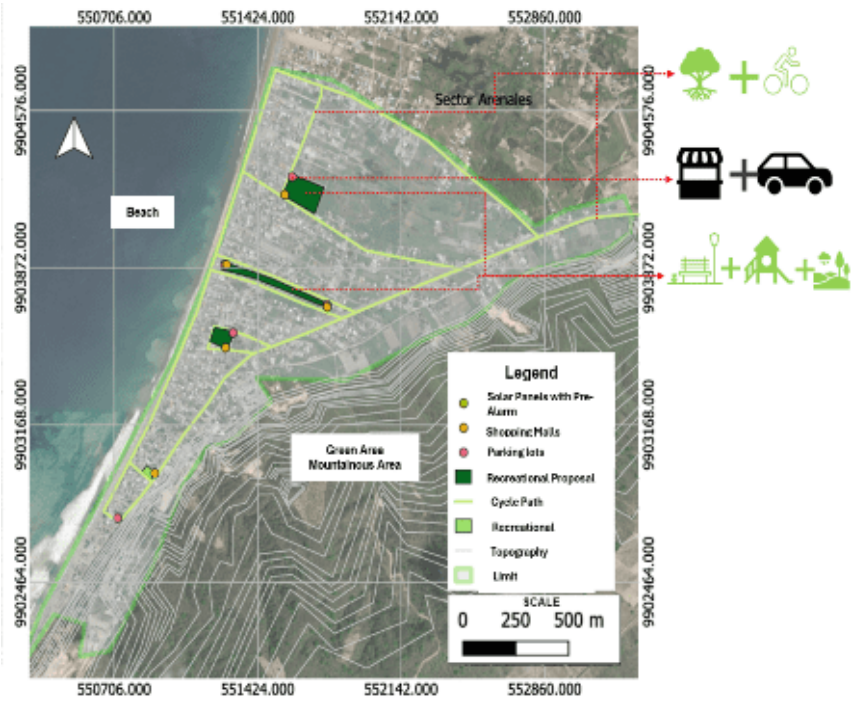
Map 9:

Resilient Proposal for the parish seat of Crucita.



Map 10:

Proposed Location of Facilities for the Parish Headquarters of Crucita.



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

INGENIO
2026, VOL 9(1), ENERO - JUNIO, PP. 051-059

REVISTA INGENIO

Desarrollo de un Sistema de Visión Artificial para la Detección no Destructiva de Plátanos

Development of a Computer Vision System for the Non-Destructive Detection of Bananas

Miguel Ángel Durán Fonseca | Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica (México)
Jesús Alejandro Padilla Ayala | Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica (México)
Jorge Gudiño Lau | Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica (México)
Saida Miriam Charre Ibarra | Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica (México)
Janeth Aurelia Alcalá Rodríguez | Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica (México)

Recibido: 2/6/2025
Recibido tras revisión: 23/9/2025
Aceptado: 15/10/2025
Publicado: 28/1/2026

PALABRAS CLAVE
Visión artificial, Clasificación de frutas, Inteligencia artificial, Inspección no destructiva.

RESUMEN
La evaluación de la calidad en frutas frescas es esencial para garantizar su valor comercial y reducir pérdidas en la cadena de suministro. Este artículo presenta el desarrollo de un sistema basado en visión artificial para la detección no destructiva de plátanos, con el fin de automatizar el proceso de clasificación según su madurez. Se utilizó el algoritmo YOLOv11 entrenado con un conjunto de datos que consta de 824 imágenes de plátanos en diferentes estados (verde, maduro y pasado). El sistema fue implementado sobre una banda transportadora, incorporando componentes impresos en 3D y un mecanismo de segregación automática. Las pruebas realizadas demostraron una precisión del 97.2% en la clasificación, validando su aplicabilidad en entornos agroindustriales.

KEY WORDS
Computer vision, Fruit classification, Artificial intelligence, Non-destructive inspection.

ABSTRACT
Quality assessment in fresh fruits is essential to ensure their commercial value and reduce losses throughout the supply chain. This paper presents the development of a computer vision–based system for the non-destructive detection of bananas, aiming to automate the classification process according to ripeness. The YOLOv11 algorithm was trained with a dataset consisting of 824 banana images in different states (green, ripe, and overripe). The system was implemented on a conveyor belt, incorporating 3D-printed components and an automatic segregation mechanism. Experimental tests achieved a classification accuracy of 97.2%, validating the applicability of the proposed system in agro-industrial environments.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad de los productos agrícolas frescos, como el plátano, es un factor crítico en la cadena de valor agroalimentaria, influyendo directamente en la satisfacción del consumidor y en la competitividad de los productores. La evaluación adecuada del estado de madurez y la detección temprana de defectos visuales son fundamentales para garantizar que los productos que lleguen al consumidor final cumplan con los estándares establecidos [1].

El problema a resolver en este trabajo radica en contar con un método automatizado, confiable y eficiente para la clasificación de plátanos según su estado de madurez y condiciones de calidad. Tradicionalmente, este proceso ha sido realizado mediante inspección visual manual, llevada a cabo por operarios en líneas de empaque. Si bien este método es funcional, presenta múltiples desventajas: es subjetivo, dependiente del criterio del operario, propenso a errores y difícil de escalar en contextos de

https://doi.org/10.29166/ingenio.v9i1.8351
2025 Universidad Central del Ecuador
CC BY-NC 4.0 —Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional
pISSN 2588-0829
eISSN 2697-3243
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

producción masiva. Además, implica altos costos asociados a la mano de obra, presenta limitaciones en la detección de defectos sutiles y carece de trazabilidad objetiva de los datos evaluados [2].

La visión artificial ha emergido como una tecnología disruptiva en este ámbito, permitiendo automatizar tareas de inspección visual mediante sistemas capaces de adquirir, procesar y analizar imágenes de forma precisa, rápida y consistente. Combinada con algoritmos de aprendizaje automático, particularmente aquellos basados en Redes Neuronales Convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés *Convolutional Neural Network*), la visión artificial puede alcanzar niveles de precisión superiores a los del ojo humano en la clasificación de frutas según su madurez, coloración, textura y presencia de defectos [3].

En el caso específico del plátano, fruta de alta rotación y relevancia económica en múltiples regiones del mundo, la determinación de su estado de madurez es esencial para decidir su destino comercial: exportación, consumo inmediato o descarte. La clasificación entre plátanos verdes, maduros y pasados tiene implicaciones directas en la logística, el precio y la aceptación del consumidor. Un sistema automatizado de detección no destructiva, basado en visión artificial, representa una alternativa tecnológica que puede mejorar sustancialmente este proceso [4].

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema de visión artificial para la detección no destructiva de plátanos, basado en técnicas de aprendizaje profundo. El sistema de visión artificial propuesto es capaz de superar las limitaciones inherentes a la inspección visual humana, al ofrecer mayor objetividad, consistencia y eficiencia en la clasificación de los frutos. El sistema propuesto integra una banda transportadora, una cámara digital convencional y un mecanismo de segregación automática, todos controlados mediante software especializado. El modelo de inteligencia artificial (IA) utilizado está basado en la arquitectura YOLOv11 (por sus siglas en inglés *You Only Look Once*, versión 11), la cual fue entrenada con un conjunto de datos propio, compuesto por imágenes etiquetadas de plátanos en diferentes estados de madurez.

Con base en la revisión de literatura reciente, se seleccionó el modelo YOLOv11 debido a su amplio uso y desempeño en aplicaciones agrícolas. Este modelo demuestra un rendimiento sobresaliente en diversas aplicaciones agrícolas, con estudios que reportan altas tasas de precisión y capacidades de detección en tiempo real para el monitoreo de cultivos, la detección de enfermedades y la evaluación de calidad.

La evidencia abarca múltiples dominios agrícolas con métricas de desempeño sólidas. En la detección de defectos en frutas, YOLOv11 fue empleado en la detección de enfermedades en guayabas considerando cinco tipos de afecciones [5]. Los estudios sobre detección de enfermedades en plantas para veinte tipos de enfermedades [6] y para enfermedades en hojas de tomate [7]. En aplicaciones de evaluación de calidad, se utilizó en la clasificación de fresas [8], así como en la detección del grado de madurez de tomates [9]. Otras aplicaciones incluyen la detección de malezas en agricultura de precisión [10] y el monitoreo acuícola para la detección de estanques de camarón [11]. El modelo demuestra de manera consistente capacidades de procesamiento en tiempo real adecuadas para sistemas agrícolas automatizados.

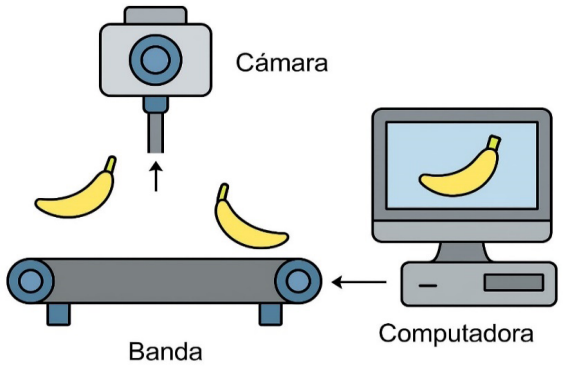
A lo largo del artículo se describe el proceso de diseño del sistema, la metodología de entrenamiento del modelo, los criterios de evaluación utilizados, así como los resultados obtenidos en entornos de prueba controlados. El enfoque propuesto busca contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas accesibles y escalables para la industria agroalimentaria, fomentando la transición hacia sistemas inteligentes de inspección que permitan reducir pérdidas, optimizar recursos y garantizar productos de mayor calidad para el consumidor final.

2. MÉTODO

El sistema propuesto fue desarrollado con el objetivo de realizar una detección no destructiva del estado de madurez de plátanos mediante visión artificial y técnicas de aprendizaje profundo. La arquitectura general está compuesta por una banda transportadora, una cámara digital para la adquisición de imágenes, un sistema de segregación automatizado y un modelo de inteligencia artificial entrenado con un conjunto específico de imágenes de plátanos. En la Fig. 1 se muestra un diagrama de los elementos que conforman el sistema.

Fig. 1.

Componentes físicos del sistema propuesto



A continuación, en la Tabla. 1, se presenta un resumen de los principales componentes que integran el sistema de visión artificial desarrollado para la detección no destructiva de plátanos. Cada elemento cumple una función específica dentro del proceso automatizado, desde la adquisición de imágenes hasta la clasificación y segregación del fruto. El diseño se ha enfocado en mantener una arquitectura modular, de bajo costo y fácilmente replicable para aplicaciones en entornos académicos e industriales.

TABLA I.
Componentes del sistema de visión artificial

Componente	Descripción
Computadora portátil	Ejecuta el modelo YOLOv11 y procesa las imágenes en tiempo real.
Cámara USB	Captura las imágenes de los plátanos sobre la banda transportadora.
Banda transportadora	Sistema mecánico que traslada los plátanos frente a la cámara.
Mecanismo de segregación	Compuerta accionada por servomotor que separa los plátanos "malos".
Servomotor	Motor de precisión encargado del movimiento de la compuerta.
Estructura impresa en 3D	Soportes personalizados para cámara y elementos mecánicos.
Fuente de alimentación	Suministra energía a los motores y a los componentes electrónicos.

2.1. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES Y BASE DE DATOS

Para entrenar el modelo de detección, se creó un conjunto de datos propio compuesto por imágenes de plátanos en tres etapas de maduración: inmaduro (verde), maduro (amarillo) y pasado (con manchas marrones). Las imágenes fueron capturadas en condiciones controladas de iluminación con el fin de minimizar variaciones por sombras o reflejos.

La calidad de las imágenes fue un factor determinante para el entrenamiento exitoso del modelo. Por ello, se estableció como criterio de inclusión la nitidez y claridad de las muestras. Estudios previos han demostrado que el éxito del aprendizaje profundo en visión artificial depende en gran medida de la calidad y representatividad de los datos de entrada [3], [12].

Las imágenes fueron etiquetadas en dos categorías:

- Plátanos buenos: incluyen los estados verde e intermedio (maduro), considerados comercializables.
- Plátanos malos: incluyen ejemplares con deterioro avanzado, no aptos para la venta.

Esta categorización binaria permite simplificar el proceso de clasificación y facilitar la toma de decisiones automatizada en entornos industriales, como sugieren [2], [4].

2.2. MODELO DE DETECCIÓN Y ENTRENAMIENTO

Se utilizó el modelo YOLOv11, un algoritmo de detección de objetos basado en CNN, conocido por su alta precisión y velocidad de inferencia en tiempo real [13]. YOLO permite realizar detección y clasificación simultáneamente con gran eficiencia computacional, lo que lo hace ideal para aplicaciones en líneas de producción [14].

Se tomaron un total de 410 imágenes de plátanos capturadas en condiciones controladas de iluminación y fondo neutro. Las imágenes fueron tomadas utilizando una cámara USB de alta resolución, instalada a una altura aproximada de 20 cm sobre la banda transportadora y con un ángulo de inclinación de entre 37° y 45° respecto al plano horizontal, lo que permitió obtener una vista oblicua del fruto para reducir las oclusiones parciales.

Las imágenes se adquirieron bajo iluminación artificial difusa, con una resolución de 1920 × 1080 píxeles, evitando reflejos o sombras que pudieran afectar la detección de contornos y texturas. La banda transportadora operó a una velocidad constante de 0.5 m/s, permitiendo un flujo uniforme de los frutos en el área de escaneo y facilitando la adquisición continua de cuadros para el análisis en tiempo real.

Cada imagen fue procesada mediante técnicas de *data augmentation* para mejorar la robustez del modelo frente a cambios de iluminación, rotación o escala, tal como se recomienda en [15]. Estas técnicas consisten en la modificación artificial de las imágenes originales, generando variaciones plausibles que permiten simular diferentes escenarios de captura sin necesidad de aumentar físicamente el volumen de datos.

Las técnicas de *data augmentation* que se utilizaron fueron las siguientes:

- Flip horizontal, que invierte la imagen en modo espejo, permitiendo que el modelo reconozca los frutos independientemente de su orientación lateral.
- Crop, consistente en un recorte o *zoom* del 15% sobre el área original de la imagen, lo que simula variaciones en la distancia de captura.
- Rotación, mediante giros de ±15° hacia la izquierda y hacia la derecha, para reproducir cambios en la orientación del fruto sobre la banda.

Gracias a la aplicación combinada de estas técnicas, el conjunto de datos aumentó de 410 a 824 imágenes, mejorando así la representación de distintas condiciones visuales.

Estas transformaciones se aplicaron de manera aleatoria y combinada durante el proceso de entrenamiento. Según Goodfellow et al. [15], estas técnicas son fundamentales para evitar el sobreajuste (*overfitting*) y aumentar la capacidad del modelo para generalizar a nuevos escenarios no vistos durante el entrenamiento.

Una vez aplicadas las técnicas de *data augmentation*, el conjunto de datos utilizado para el entrenamiento y validación del modelo YOLOv11 estuvo conformado por un total de 824 imágenes.

El conjunto de datos se dividió de la siguiente manera: 621 imágenes (75%) para entrenamiento, 122 imágenes (15%) para validación y 81 imágenes (10%)

para prueba, manteniendo el equilibrio entre clases y garantizando una adecuada generalización del modelo. El entrenamiento se llevó a cabo durante 100 épocas, con un tamaño de lote de 16 imágenes y una tasa de aprendizaje inicial de 0.001. Cada sesión de entrenamiento tuvo una duración aproximada de 40 minutos.

2.3. HARDWARE Y COMPONENTES FÍSICOS

El sistema físico fue montado sobre una banda transportadora comercial, sobre la cual se dispuso la fruta para ser inspeccionada por la cámara. La estructura fue complementada con soportes impresos en 3D para alojar tanto la cámara como el sistema de accionamiento del mecanismo de segregación.

En la fig. 2, se presenta una fotografía del prototipo físico del sistema de visión artificial para la detección no destructiva de plátanos. Se observa una computadora portátil encargada de ejecutar el modelo de detección YOLOv11, una cámara utilizada para capturar las imágenes de los plátanos, y una banda transportadora. Este montaje permite la adquisición de datos en tiempo real y la activación del sistema de clasificación automatizada.

Fig. 2.

Prototipo físico del sistema

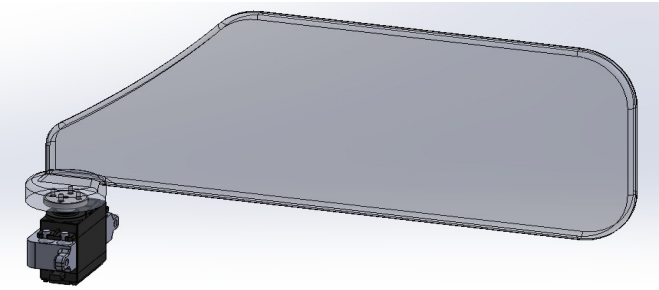
La integración entre el software de visión artificial y el sistema físico de segregación se realizó mediante una conexión directa entre Python y Arduino, utilizando como interfaz de comunicación la computadora portátil donde se ejecuta el modelo YOLOv11. La cámara captura imágenes en tiempo real y las envía al sistema en Python, que procesa cada cuadro y determina el estado del plátano con base en la predicción del modelo.

Cuando el algoritmo identifica un plátano en mal estado, se genera una señal digital a través del puerto serial USB que comunica a la computadora con el microcontrolador Arduino UNO. Este actúa como intermediario entre la inteligencia artificial y el mecanismo físico, activando el servomotor encargado de accionar la compuerta del sistema de segregación. De esta forma, la decisión computacional derivada del modelo de detección se traduce en una respuesta mecánica inmediata, lo que permite la clasificación automatizada de los plátanos sin intervención humana.

El diseño en CAD del mecanismo de segregación del sistema de clasificación de plátanos se presenta en la Fig. 3. Se muestra una compuerta accionada mediante un servomotor, la cual tiene como función desviar los plátanos clasificados como “malos” fuera de la línea principal de transporte. El diseño permite una respuesta rápida y precisa, integrándose directamente al sistema de visión artificial mediante control electrónico sincronizado. La arquitectura de control se diseñó para ser modular y de bajo costo, siguiendo lineamientos similares a los propuestos en [1].

Fig. 3.

Diseño en CAD del mecanismo de segregación



El sistema fue evaluado mediante pruebas con plátanos individuales y en racimos (“manos”), simulando condiciones operativas reales. Se verificó la capacidad del modelo para identificar correctamente las clases objetivo con una tasa de acierto superior al 90% en condiciones controladas. La validación se alineó con metodologías recomendadas por la literatura para sistemas de inspección automatizada [16].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. DESEMPEÑO DEL MODELO YOLOV11 EN CONDICIONES CONTROLADAS

El modelo YOLOv11 fue entrenado a lo largo de 100 épocas utilizando un conjunto de datos exclusivo de imágenes de plátanos divididas en dos clases: “buenos” (etapas verde y madura) y “malos” (etapa pasada o deteriorada).

Para garantizar una evaluación objetiva y confiable del desempeño del modelo de visión artificial, el conjunto de 824 imágenes fue dividido en tres subconjuntos con funciones específicas: entrenamiento, validación y prueba. Esta práctica es estándar en el desarrollo de modelos de aprendizaje automático, ya que permite medir la capacidad de generalización del sistema y prevenir el sobreajuste (overfitting) [15].

- Conjunto de entrenamiento (75%): Incluye la mayoría de las imágenes disponibles. Su función

principal es permitir al modelo aprender los patrones característicos de las clases objetivo (en este caso, plátanos buenos y malos). Durante esta etapa, los pesos de la red neuronal son ajustados mediante un proceso iterativo de retropropagación.

- Conjunto de validación (15%): Se utiliza durante el proceso de entrenamiento, pero no forma parte directa de los datos que el modelo ve para aprender. Su propósito es evaluar el rendimiento del modelo en datos distintos a los de entrenamiento en cada época, lo cual permite detectar signos de sobreajuste y ajustar hiperparámetros como la tasa de aprendizaje, número de épocas, funciones de pérdida, etc.
- Conjunto de prueba (10%): Este subconjunto es completamente independiente y se reserva para una evaluación final del modelo una vez concluido el entrenamiento. Sirve para simular cómo se comportará el sistema frente a nuevos datos no vistos, proporcionando métricas objetivas de desempeño (precisión, recall, F1-score, etc.).

Esta división garantiza que el modelo no solo funcione bien con los datos que conoce (entrenamiento), sino también con casos nuevos y reales, lo cual es esencial para aplicaciones prácticas como la clasificación de frutas en tiempo real.

Para evaluar el rendimiento del modelo de visión artificial, se emplearon métricas estándar ampliamente utilizadas en el ámbito del aprendizaje automático y la visión por computadora. Estas métricas permiten cuantificar la capacidad del sistema para clasificar correctamente los objetos en las categorías definidas (en este caso, plátano "bueno" o "malo"). A continuación, se describen las principales métricas utilizadas:

- Precisión (*Precision*): Mide la proporción de verdaderos positivos entre todas las predicciones positivas realizadas por el modelo. Indica qué tan confiables son las predicciones positivas. La precisión se calcula de la siguiente forma:

$$Precision = \frac{VP}{VP + FP} \tag{1}$$

donde:

VP = Verdaderos positivos,
FP = Falsos positivos.

- Exhaustividad o Sensibilidad (*Recall*): Evalúa la capacidad del modelo para identificar correctamente todos los casos positivos reales. Es decir, cuántos de los plátanos "buenos" fueron correctamente detectados. Para calcular esta métrica se utiliza la siguiente ecuación:

$$Recall = \frac{VP}{VP + FN} \tag{2}$$

donde:

FN = Falsos negativos.

- Exactitud (Accuracy): Representa el porcentaje total de predicciones correctas (positivas y negativas) respecto al total de casos. La fórmula para calcular la exactitud se presente en la ec. (3).

$$Accuracy = \frac{VP + VN}{TOTAL} \tag{3}$$

donde:

VN = Verdaderos negativos,
TOTAL = Total de predicciones.

- Puntuación F1 (*F1-Score*): Es la media armónica entre la precisión y la exhaustividad. Es una métrica equilibrada que resulta útil especialmente cuando existe un desbalance entre clases, y se calcula de la siguiente forma:

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \tag{4}$$

Estas métricas proporcionan una visión integral del desempeño del modelo, permitiendo identificar fortalezas y debilidades específicas. En este trabajo, se reportan todas ellas para ofrecer una evaluación completa de la efectividad del sistema propuesto en condiciones reales de operación. Las métricas obtenidas tras finalizar el entrenamiento son las siguientes:

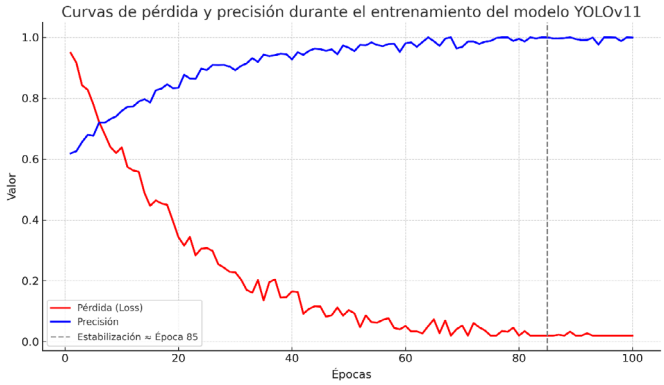
- Precisión (*Precision*): 97.2%
- Exhaustividad (*Recall*): 96.8%
- Exactitud (*Accuracy*): 96.9%
- Puntuación F1 (*F1 Score*): 97.0%

Estas métricas demuestran un desempeño sobresaliente, lo cual valida la hipótesis de que una red neuronal convolucional moderna como YOLOv11, correctamente entrenada con un conjunto de datos específico y representativo, puede clasificar con alta fiabilidad el estado de madurez de frutas como el plátano. Las cifras obtenidas son comparables con resultados de investigaciones similares que aplicaron modelos CNN para clasificación de frutas [17].

Además, se observó que el modelo convergió de manera estable, sin sobreajuste evidente, lo cual se atribuye tanto al equilibrio en las clases del conjunto de datos como al uso adecuado del conjunto de validación. Las curvas de pérdida y precisión durante el entrenamiento mostraron una mejora sostenida, con estabilización hacia la época 85 (ver. Fig. 4).

Fig. 4.

Curvas de pérdida y precisión durante el entrenamiento del modelo



La función de pérdida mide la diferencia entre las predicciones del modelo y las etiquetas reales del conjunto de entrenamiento, y es el parámetro que se minimiza mediante retropropagación en cada iteración. En el caso de YOLOv11, la pérdida es una combinación de varios términos que incluyen errores de localización (*bounding boxes*), clasificación y confianza del objeto detectado [13].

Estos resultados refuerzan la validez del modelo propuesto, evidenciando su eficacia en la clasificación no destructiva de frutos y su potencial de aplicación en líneas de selección automatizadas.

3.2. EVALUACIÓN FUNCIONAL DEL SISTEMA CON ENTRADAS INDIVIDUALES Y AGRUPADAS

Durante las pruebas experimentales se evaluó la capacidad del sistema para identificar correctamente el estado de madurez en dos escenarios:

1. **Pruebas con plátanos individuales:** En esta etapa inicial, los frutos fueron colocados uno a uno sobre la banda transportadora. El sistema demostró una alta sensibilidad para reconocer características visuales como la tonalidad del color, textura y manchas, discriminando con precisión los estados "verde", "maduro" y "pasado".

   En la fig. 5 se muestra el resultado de la detección automática de plátanos en estado de descomposición. La imagen muestra tres frutos clasificados como "plátanos malos" con una confianza del 100%, evidenciando la capacidad del sistema para identificar características visuales asociadas a deterioro avanzado, como manchas oscuras, textura irregular y cambios de coloración. Las cajas delimitadoras verdes indican la segmentación precisa realizada por la red neuronal durante la inferencia.

Fig. 5.

Resultado de pruebas con plátanos individuales

En la fig. 6 del anexo, se presentan los resultados de la detección de plátanos clasificados como "buenos" por el modelo YOLOv11. Se observa que ambos frutos fueron identificados correctamente con una confianza del 100%, lo que evidencia la capacidad del sistema para reconocer características visuales asociadas al estado óptimo de madurez, tales como color homogéneo y ausencia de manchas significativas. Este resultado confirma la robustez del modelo en escenarios de iluminación controlada y con objetos aislados, reforzando la validez de su aplicación en la clasificación automática durante el proceso de empaque.

Al comparar los resultados obtenidos en las pruebas con plátanos clasificados como "malos" (Fig. 5) y aquellos identificados como "buenos" (Fig. 6), se confirma la capacidad del modelo YOLOv11 para discriminar entre diferentes estados de maduración con altos niveles de confianza. En ambos casos, el sistema alcanzó un 100% de certeza en la predicción, lo que indica una correcta extracción de características visuales relevantes como la coloración, presencia de manchas oscuras y textura superficial.

Mientras que en los plátanos en buen estado se destacan tonalidades verdes o amarillas uniformes, en los plátanos deteriorados predominan áreas con oscurecimiento irregular y pérdida de firmeza, factores que el modelo logra identificar consistentemente. Este contraste en los resultados evidencia la eficacia del sistema para diferenciar condiciones extremas de madurez, aunque se mantiene la necesidad de refinar la clasificación en estados intermedios, donde la frontera entre categorías no siempre es visualmente evidente.

2. **Pruebas con racimos ("manos") de plátanos:** Esta segunda etapa simuló condiciones más

cercanas a un entorno productivo real, donde los plátanos llegan agrupados. A pesar del mayor nivel de complejidad visual, el sistema logró identificar correctamente la mayoría de los frutos en el racimo. Las métricas se mantuvieron dentro del rango de error esperado, con una leve reducción del recall (≈94.7%), atribuida a la oclusión parcial de algunos plátanos.

El resultado de la clasificación simultánea de plátanos con diferente grado de madurez se muestra en la Fig. 7 del anexo. El sistema identifica correctamente un plátano bueno (verde) y un plátano malo (pasado) con una confianza del 100% en ambos casos. Esta imagen demuestra la capacidad del modelo para realizar detecciones múltiples dentro del mismo encuadre, discriminando entre clases incluso cuando los objetos están parcialmente superpuestos.

En ambas configuraciones, la activación del mecanismo de segregación se sincronizó adecuadamente con las predicciones de la IA, lo que indica que la comunicación entre el modelo y el actuador fue estable y eficiente.

3.3. ROBUSTEZ FRENTE A VARIACIONES EN CONDICIONES

En una serie de pruebas controladas se evaluó la sensibilidad del sistema ante variaciones en la iluminación ambiental, ángulos de cámara y distancias de visualización. Se identificó que:

- Bajo condiciones óptimas de iluminación (luz difusa y estable), la detección se mantuvo precisa y veloz.
- En condiciones de contraluz o sombra marcada, la precisión disminuyó hasta en un 8%, especialmente en plátanos parcialmente maduros.
- Cambios bruscos en la distancia o enfoque afectaron la nitidez de la imagen, lo que ocasionó errores puntuales de clasificación.

Estos hallazgos concuerdan con lo reportado por Saragih et al. [18], quienes resaltaron la importancia de mantener condiciones controladas de iluminación y enfoque en sistemas de visión artificial aplicados a clasificación de frutas en movimiento.

3.4. ANÁLISIS DE ERRORES Y POSIBLES MEJORAS

Se identificaron errores de clasificación en menos del 4% de los casos. Estos errores se concentraron en:

- Frutas parcialmente cubiertas o en posiciones anguladas.
- Plátanos con estados intermedios difíciles de clasificar visualmente (verde-maduro o maduro-pasado).

Estos errores se consideran justificados debido a que las **oclusiones parciales** y los **ángulos de observación no frontales** reducen la cantidad de información visual disponible para el modelo, dificultando la correcta identificación de características relevantes como color, textura o contorno. Asimismo, los **estados intermedios de maduración** presentan transiciones graduales en la apariencia del fruto, lo que genera ambigüedad incluso para un observador humano. En consecuencia, es esperable que un sistema de visión artificial registre cierto margen de error en estos escenarios límite, los cuales constituyen casos particularmente complejos dentro de la clasificación automática de plátanos.

Para mitigar estos errores, se propone:

- Ampliar el conjunto de datos con más ejemplos en condiciones adversas. Por ejemplo: recopilar imágenes con oclusiones parciales, ángulos extremos y fondos variados.
- Incorporar técnicas de *data augmentation* específicas para simular rotaciones, sombras o reflejos.
- Optimizar el ángulo y posición de la cámara para mejorar la visibilidad constante de los objetos.
- Iluminación controlada: difusores, túnel negro y filtros polarizadores para minimizar brillos/sombras.
- Cámara: fijar exposición/balance de blancos; aumentar resolución útil para texturas finas.
- Multivista: 2 cámaras a 90° (o espejo perimetral) para reducir oclusiones sin mover la fruta.

4. CONCLUSIONES

La presente investigación ha demostrado la viabilidad técnica y funcional de un sistema de visión artificial basado en inteligencia artificial, específicamente mediante el uso del modelo YOLOv11, para la detección no destructiva del estado de madurez de plátanos. La combinación de técnicas avanzadas de aprendizaje profundo, un conjunto de datos bien estructurado y una implementación física eficiente permitió desarrollar un prototipo capaz de operar con alta precisión en condiciones controladas.

Los resultados obtenidos, con métricas superiores al 96% en precisión, exactitud y puntuación F1, validan la hipótesis inicial: una inteligencia artificial bien entrenada puede superar las limitaciones de la inspección visual manual, reduciendo errores, mejorando la consistencia de la clasificación y aumentando la velocidad de procesamiento. La implementación del sistema sobre una banda transportadora, junto con mecanismos de

segregación automatizados, confirma su aplicabilidad práctica en entornos industriales reales.

Asimismo, se comprobó que el modelo mantiene un buen desempeño frente a variaciones en la presentación del objeto, aunque se identificaron ciertas limitaciones bajo condiciones de iluminación desfavorable o en la presencia de oclusión parcial de los frutos. Estas observaciones abren la puerta a mejoras futuras mediante el enriquecimiento del *dataset*, técnicas de *data augmentation* y el ajuste de parámetros de adquisición de imágenes.

Desde una perspectiva aplicada, este desarrollo representa un avance hacia la automatización inteligente del control de calidad en la agroindustria, contribuyendo a la reducción de pérdidas postcosecha y al aseguramiento de la calidad en productos perecederos. Su enfoque modular y de bajo costo lo convierte en una alternativa escalable, adaptable a otros tipos de frutas y productos hortofrutícolas, así como a sistemas más complejos integrados con robótica e IoT.

El sistema propuesto no solo demuestra un alto grado de precisión técnica, sino que también sienta las bases para futuras implementaciones industriales orientadas a la sostenibilidad, eficiencia operativa y mejora continua en la cadena de valor agroalimentaria.

REFERENCIAS

[1] D. Escobar Figueroa y E. Roa Guerrero, «Sistema de visión artificial para la identificación del estado de madurez de frutas (granadilla)», *Redes de Ingeniería*, vol. 7, n.º 1, pp. 78-86, jun. 2016, https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.redes.2016.1.a08.

[2] L. O. Villarreal Ger, «Prototipo para la detección y clasificación de productos alimenticios mediante visión artificial en base al color», *Conectividad*, vol. 5, n.º 2, pp. 46-62, feb. 2024, https://doi.org/10.37431/conectividad.v5i2.129.

[3] K. Yu *et al.*, «Advances in Computer Vision and Spectroscopy Techniques for Non-Destructive Quality Assessment of Citrus Fruits: A Comprehensive Review», *Foods*, vol. 14, n.º 3, p. 386, ene. 2025, https://doi.org/10.3390/foods14030386.

[4] R. Sucari León, Y. Aroquipa Durán, L. D. Quina Quina, y E. Quispe Yapo, «Visión artificial en reconocimiento de patrones para clasificación de frutas en agronegocios», *PURIQ*, vol. 2, n.º 2, abr. 2020, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/340571315_Vision_artificial_en_reconocimiento_de_patrones_para_clasificacion_de_frutas_en_agronegocios

[5] G. Madasamy Raja, P. Selvaraju, P. Pathmanaban, y C. G. Manuvel Antony, «YOLOv11n for precision agriculture: lightweight and efficient detection of guava defects across diverse conditions», *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 105, n.º 11, pp. 6182-6195, may 2025, https://doi.org/10.1002/jsfa.14331.

[6] G. Shanmugam, D. Balusamy, K. R. KavinSubash, S. Ajay, y K. Gokul, «Sustainable Agriculture with Advanced Plant Disease Detection using YOLOv11 and XAI», presentado en 2025 IEEE 14th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), Bhopal, India, mar. 2025, pp. 598-603. https://doi.org/10.1109/CSNT64827.2025.10968901.

[7] M. Al Husaini, A. R. Raharja, V. H. C. Putra, y H. H. Lukmana, «Enhanced Plant Disease Detection Using Computer Vision YOLOv11: Pre-Trained Neural Network Model Application», *Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing*, vol. 7, n.º 1, pp. 82-95, 2025.

[8] A. Fahriansyah, P. M. El Zaky, L. Novamizanti, y S. Sa'idah, «YOLOv11 for Classification of Strawberry Quality and Ripeness», presentado en 2025 IEEE International Conference on Artificial Intelligence for Learning and Optimization (ICoAILO), Bali, Indonesia, ago. 2025, pp. 93-99. https://doi.org/10.1109/ICoAILO66760.2025.11156057.

[9] S. M. Shendkar, R. V. Shimpi, A. S. Todmal, C. Sukte, P. Futane, y M. Kodmelwa, «Utilizing YOLOv10 and YOLO11 for Tomato Ripeness Detection in Vertical Farming», *Advances in Nonlinear Variational Inequalities*, vol. 28, n.º 5s, pp. 290-302, ene. 2025, https://doi.org/10.52783/anvi.v28.3905.

[10] A. B. Shaik, A. K. Kandula, G. K. Tirumalasetti, B. Yendluri, y H. K. Kalluri, «Comparative Analysis of YOLOv11 and YOLOv12 for Automated Weed Detection in Precision Agriculture», presentado en 2025 5th International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN), Salem, India, may 2025, pp. 787-793. https://doi.org/10.1109/ICPCSN65854.2025.11036078.

[11] A. C. Ferreira *et al.*, «Aplicando o Modelo YOLOv11 para Detectar e Segmentar Viveiros de Camarão em Imagens Georreferenciadas», presentado en XVI Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais, Maceió, Brasil: SBC, jul. 2025, pp. 30-38. https://doi.org/10.5753/wcama.2025.7190.

[12] L. Pencue-Fierro y J. León Téllez, «Detección y clasificación de defectos en frutas mediante el procesamiento digital de imágenes», *Revista Colombiana de Física*, vol. 35, n.º 1, enero de 2003. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/238095132_Deteccion_y_clasificacion_de_defectos_en_frutas_mediante_el_procesamiento_digital_de_imagenes

[13] Ultralytics, «YOLOv11 Documentation». Accedido: 22 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://docs.ultralytics.com/es/models/yolo11

[14] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, y A. Farhadi, «You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection», 9 de mayo de 2016, arXiv:1506. Accedido: 22 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://arxiv.org/abs/1506.02640

[15] I. Goodfellow, Y. Bengio, y A. Courville, *Deep Learning*. en Adaptive Computation and Machine Learning series. MIT Press, 2016. [En línea]. Disponible en: https://mitpress.mit.edu/9780262035613/deep-learning/

[16] E. Saldaña, R. Siche, M. Luján, y R. Quevedo, «Review: computer vision applied to the inspection and quality control of fruits and vegetables Review: computer vision applied to the inspection and quality control of fruits and vegetables», *Brazilian Journal of Food Technology*, vol. 16, n.º 4, diciembre de 2013. [En línea]. https://doi.org/10.1590/S1981-67232013005000031

[17] L. Yang *et al.*, «Automatic Detection of Banana Maturity—Application of Image Recognition in Agricultural Production», *Processes*, vol. 12, n.º 4, p. 799, abril de 2024.

[18] R. E. Saragih, A. R. Purnajaya, I. Syafrinal, Y. Pernando, y Yodi, «Mango and Banana Ripeness Detection based on Lightweight YOLOv8», *Jurnal Buana Informatika*, vol. 15, n.º 2, pp. 79-88, oct. 2024.

ANEXOS

Fig. 6.

Resultado de pruebas con plátanos individuales

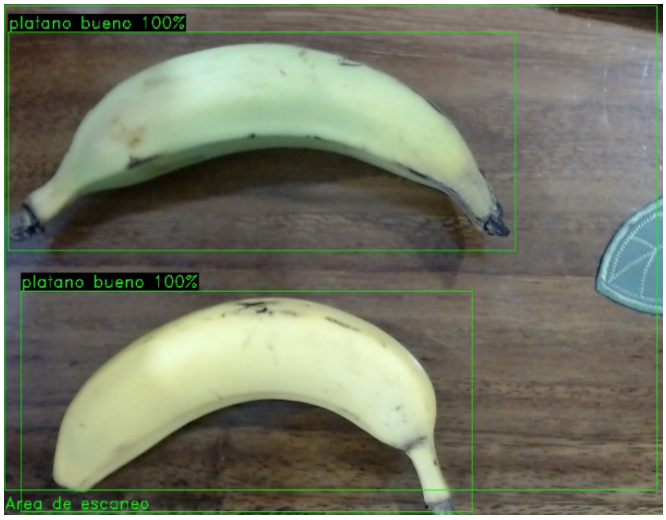
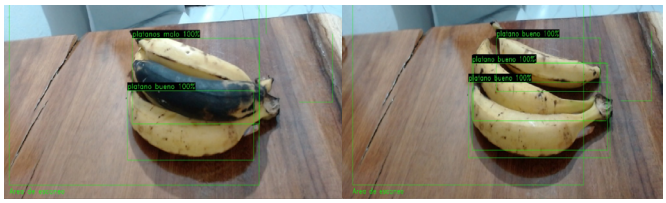


Fig. 7.

Resultado de pruebas con plátanos en racimos



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

INGENIO
2026, VOL 9(1), ENERO - JUNIO, PP. 060-065

REVISTA INGENIO

Using Death Certificates to Estimate Work-related Fatalities from Falls from Height in the Construction Industry in Ecuador, 2013–2023

Uso de Certificados de Defunción para Estimar las Muertes Laborales por Caídas desde Altura en la Industria de la Construcción en Ecuador, 2013–2023

Antonio Ramón Gómez García | Universidad Espíritu Santo, Samborondón (Ecuador)

Recibido: 20/10/2025
Recibido tras revisión: 31/10/2025
Aceptado: 4/11/2025
Publicado: 28/1/2026

KEY WORDS
Falls from height, Death certificates, Work-related mortality, Construction industry, Ecuador.

ABSTRACT
Falls from heights (FFH) are a major cause of occupational fatalities in the construction industry. In developing countries, underreporting in social security records limits accurate knowledge of work-related mortality. This observational and descriptive study examined FFH deaths in Ecuador's construction sector from 2013 to 2023 using data from the Statistical Registry of General Deaths. Cases were identified through ICD-10 codes (W11, W12, W13, W17, W19) with the place of occurrence classified as construction (.6). Descriptive and inferential analyses were conducted (Kruskal–Wallis test, $p < 0.05$), and working years of potential life lost (WYPLLs) were estimated. Fatal FFH incidents increased until 2017 (14.0%), decreased during 2020–2021, and rose again in 2022–2023. Most deaths occurred in Pichincha (48.2%), primarily from falls from scaffolding (W12, 65.5%). The mean age was 39.6 years (95% CI: 38.3–40.9). Significant differences in age by cause were observed ($\chi^2 = 9.74$; $p = 0.045$), especially between W11 and W13 ($p = 0.040$). A total of 8,221 WYPLLs were estimated, mostly from scaffolding and building falls. These findings highlight a substantial mortality burden and the urgent need to reinforce preventive strategies, strengthen compliance and inspection systems, and promote safety culture within Ecuador's construction industry.

PALABRAS CLAVE
caídas desde altura, certificados de defunción, mortaldad laboral, industria de la construcción, Ecuador.

RESUMEN
Las caídas desde altura (CDA) son una de las principales causas de muertes laborales en la industria de la construcción. En los países en desarrollo, la subnotificación en los registros de seguridad social limita el conocimiento preciso de la mortalidad ocupacional. Este estudio observacional y descriptivo analizó las muertes por CDA en el sector de la construcción en Ecuador entre 2013 y 2023, utilizando datos del Registro Estadístico de Defunciones Generales. Los casos se identificaron mediante los códigos CIE-10 (W11, W12, W13, W17, W19) con lugar de ocurrencia clasificado como construcción (.6). Se realizaron análisis descriptivos e inferenciales (prueba de Kruskal–Wallis, $p < 0.05$) y se estimaron los años laborales de vida potencial perdidos (AVPP). Las muertes por CDA aumentaron hasta 2017 (14.0%), disminuyeron en 2020–2021 y repuntaron en 2022–2023. La mayoría ocurrieron en Pichincha (48.2%), principalmente por caídas desde andamios (W12, 65.5%). La edad media fue de 39.6 años (IC95%: 38.3–40.9). Se observaron diferencias significativas por causa ($\chi^2 = 9.74$; $p = 0.045$), especialmente entre W11 y W13 ($p = 0.040$). Se estimaron 8,221 AVPP, en su mayoría por caídas desde andamios y edificios. Los resultados evidencian la alta carga de mortalidad y la necesidad de fortalecer las medidas preventivas, la supervisión y la cultura de seguridad en la construcción ecuatoriana.

1. INTRODUCTION

Falls from height (FFH) are one of the most common causes of fatal traumatic injuries in the workplace worldwide [1]–[3], especially in high-risk sectors such as the construction industry [4]–[9]. In this industry, workers perform complex tasks at height that require the use of various auxiliary lifting equipment or structures, such as scaffolding, platforms, or ladders [4],[10]–[12]. The risk of mortality increases directly with the height of the fall [13,14]. Therefore, it is essential to adopt effective

https://doi.org/10.29166/ingenio.v9i1.9055
2025 Universidad Central del Ecuador
CC BY-NC 4.0 —Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional
pISSN 2588-0829
eISSN 2697-3243
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

preventive measures to reduce the risk of FFH and prevent premature death among construction workers [15]–[19].

However, the availability of detailed information on occupational accidents in the construction industry remains limited in many low- and middle-income countries [20,21], making it difficult to gain a more accurate understanding of the problem for decision-making on occupational safety and health [22,23]. For example, in the Republic of Ecuador (hereinafter Ecuador), research on fatal injuries from work accidents remains scarce [24]. To our knowledge, only one study has identified the construction industry as the second most dangerous sector in the country [25]. The main limitation of existing analyses is that they do not take into account workers in informal employment, as they are based on accidents classified by the General Occupational Risk Insurance of the Ecuadorian Social Security Institute. In addition to potential underreporting [26], the available information lacks a breakdown by type of FFH. In this regard, current scientific evidence could generate a biased view among labor inspectors when verifying with greater emphasis the occupational risk control measures included in the recent safety regulations for construction sites [27].

Given these limitations, other studies have chosen to use general mortality administrative records as a complementary source of information to estimate work-related deaths [28]–[33]. Therefore, the use of death certificates for external causes is a valuable source of information that provides a more complete picture of the causes of premature mortality in the working population. In this context, the present study aimed to reduce the existing knowledge gap and describe the epidemiological profile of fatal traumatic injuries in the construction industry in Ecuador, using alternative sources of information to official occupational accident records, in order to provide a more accurate and up-to-date understanding of the situation in the country.

2. METHODOLOGY

This observational and descriptive study used publicly available databases from the Statistical Registry of General Deaths of Ecuador [34]. As it did not involve human subjects, it was exempt from review by an Ethics Committee. The identification and selection of fatal occupational injuries (FFH) in the construction industry followed a methodology consistent with previous studies [15,35], in line with international recommendations [36], and were based on the following inclusion criteria:

(i) Diagnostic codes (ICD-10): fall on or from ladders (W11), fall on or from scaffolding (W12), fall from, out of, or through a building or other construction (W13), other falls from one level to another (W17), and unspecified falls (W19).
(ii) Location of the event: construction (.6) as a specific subcategory of the code.
(iii) Age: ≥18 years.

The data were available only from 2013 onwards, covering a 10-year period (January 2013 to December 2023). The characterization of the profiles of deceased persons was limited by the variables available in the information source used. After a review of the records, a total of 336 deaths were selected (men only).

In addition to absolute (n) and relative (%) distributions, the statistical analysis focused on the age of deceased individuals (a continuous quantitative variable) and included measures of central tendency and dispersion. Given that the Shapiro-Wilk test indicated non-normality ($W = 0.968$; $p < 0.001$) [37], we used the nonparametric Kruskal–Wallis test [38] to identify patterns and differences in age by diagnostic codes. The level of statistical significance was set at $p < 0.05$, and all analyses were performed using Jamovi software [39].

As a complementary component of the study, working years of potential life lost (WYPLLs) due to these causes of death were estimated [40] to quantify their impact on premature mortality and provide an additional indicator of the occupational health burden associated with fatal occupational injuries. The age threshold was set at 64, following a previous study conducted in Ecuador [41]. It is important to note that the use of secondary data may involve certain limitations, such as possible errors in the coding of specific causes of death, which could lead to an underestimation of the actual number of work-related deaths in the construction sector.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Between 2013 and 2019, the number of fatal traumatic injuries due to FFH increased, peaking in 2017 (14.0%) and remaining high in 2019 (13.4%). A marked decline occurred in 2020–2021, followed by a subsequent increase in 2022–2023. Most cases were concentrated in Pichincha (48.2%), with falls from scaffolding (W12, 65.5%) being the main cause (see Table 1).

The mean age of fatal cases was 39.6 years (95% CI: 38.3–40.9), with a median of 38 years. By cause (ICD-10), the highest mean age corresponded to falls from ladders (W11, 47.0 years), while the lowest was observed in falls from, out of, or through buildings or other constructions (W13, 35.1 years). The remaining categories (W12, W17, and W19) showed mean ages close to 40 years (see Table 2).

The results of the Kruskal–Wallis test showed statistically significant differences global in age according to the type of cause of death ($\chi^2 = 9.74$; $p = 0.045$). Therefore, the Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) test was applied to compare age between different types of causes and determine which causes of death show significant differences

($p < 0.05$) [42]. The DSCF post hoc test revealed a statistically significant difference ($p = 0.040$) only between falls from ladders (W11) and falls from, off, or through buildings or other structures (W13) (see Fig. 1).

Finally, a total of 8,221 WYPLLs of premature deaths attributable to FFH are estimated. Falls from scaffolding (W12) accounted for the highest social burden of mortality, with 5,275 WYPLLs, representing 64.2% of the total. This was followed by falls from buildings (W13) with 1,357 WYPLLs (16.5%). To a lesser extent, falls from unspecified levels (W19) accounted for 830 WYPLLs (10.1%), other falls from one level to another (W17) with 554 WYPLLs (6.7%), and falls from stairs (W11) with 205 WYPLLs (2.5%).

TABLE I.
Annual, provincial, and cause (ICD-10) distribution of fatal traumatic injuries due to FFH.

	n	%
Years		
2013	30	8.9
2014	31	9.2
2015	30	8.9
2016	43	12.8
2017	47	14.0
2018	37	11.0
2019	45	13.4
2020	5	1.5
2021	6	1.8
2022	25	7.4
2023	37	11.0
Province		
Pichincha	162	48.2
Guayas	53	15.8
Azuay	23	6.8
El Oro	10	3.0
Chimborazo	11	3.3
Imbabura	9	2.7
Loja	9	2.7
Manabí	8	2.4
Tungurahua	7	2.1
Cotopaxi	6	1.8
Santo Domingo de los Tsáchilas	6	1.8
ICD-10		
W11	12	3.6
W12	220	65.5
W13	47	14.0
W17	23	6.8
W19	34	10.1

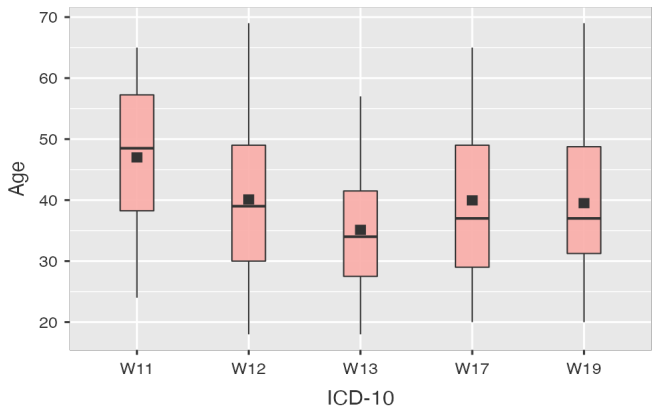
Note: ICD-10 = International Classification of Diseases 10th Revision. Provinces with ≤5 cases are not shown in the table.

TABLE II.
Age distribution of fatal traumatic injuries due to FFH by ICD-10 code.

	Mean	95% CI		SD	Median	Min.	Max.
		Lower	Upper				
ICD-10							
W11	47.0	39.0	55.0	12.5	48.5	24	65
W12	40.1	38.5	41.8	12.4	39.0	18	69
W13	35.1	32.0	38.2	10.6	34.0	18	57
W17	40.0	34.0	46.0	13.8	37.0	20	65
W19	39.5	35.2	43.8	12.4	37.0	20	69
General	39.6	38.3	40.9	12.4	38.0	18	69

Note: ICD-10 = International Classification of Diseases 10th Revision. 95% CI = 95% Confidence Interval. SD = Standard Deviation. Min. = Minimum. Max. = Maximum.

Fig. 1.
Boxplot of age distribution by ICD-10 code among fatal traumatic injuries due to FFH.



Note: ICD-10 = International Classification of Diseases 10th Revision. The horizontal line within the box indicates the Median. The black dot marks the Mean.

TABLE III.
Pairwise comparisons of age by ICD-10 category, using the DSCF test.

Comparison			W	*p*
W11	–	W12	−2.61	0.347
W11	–	W13	−3.97	0.040
W11	–	W17	−2.14	0.554
W11	–	W19	−2.39	0.440
W12	–	W13	−3.35	0.125
W12	–	W17	−0.23	1.000
W12	–	W19	−0.32	0.999
W13	–	W17	1.73	0.736
W13	–	W19	2.06	0.592
W17	–	W19	−0.07	1.000

DSCF = Dwass–Steel–Critchlow–Fligner. W = standardized difference between the average ranks of groups in the DSCF test.

4. CONCLUSIONS

This study confirms that FFH are a major cause of occupational mortality in the construction industry in Ecuador, which is consistent with findings in other countries [2,3,6,10]. The high proportion of cases associated with falls from scaffolding (65.5%) and their geographical concentration in provinces with intense construction activity, such as Pichincha and Guayas, suggest a direct relationship between economic activity, exposure to risk, and the occurrence of fatal accidents [23, 26,43]. Specifically, the capital Quito (province of Pichincha) and the city of Guayaquil (province of Guayas) are where most high-rise building construction projects are taking place.

Although this study did not aim to explain the causes of deaths, it has been found that the main factors that increase the risk of FFH include poor planning, unsafe decisions, inadequate supervision, and failures in collective protection systems [6], [8]–[10]. In addition, the use of unsuitable auxiliary structures [1], lack of training, and the age and experience of workers [11,15,17] also play a role. Taken together, these findings indicate that FFH in construction is a persistent and underestimated problem in Ecuador, possibly associated with structural deficiencies and preventive management failures.

The use of alternative sources such as death certificates proved to be a valuable tool for supplementing official records and obtaining a more accurate picture of the actual occupational mortality burden in the construction industry. The findings of this study are expected to provide solid evidence for the design and implementation of specific intervention programs and contribute to strengthening occupational safety and health regulations in the country [27].

REFERENCES

[1] C. M. Socias-Morales, C. K. Chaumont Menéndez, and S. M. Marsh, "Fatal work-related falls in the United States, 2003–2014," *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 61, no. 2, pp. 111–119, 2018, doi: 10.1002/ajim.22810.

[2] F. Li *et al.*, "Work-related and non-work-related accident fatal falls in Shanghai and Wuhan, China," *Safety Science*, vol. 117, pp. 43–48, 2019, doi: 10.1016/j.ssci.2019.04.001.

[3] WHO/ILO, *WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease and Injury, 2000–2016: Global Monitoring Report*, Geneva: World Health Organization and International Labour Organization, 2021. [Online]. Available: https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@ed_dialogue/@lab_admin/documents/publication/wcms_819788.pdf

[4] E. A. Nadhim, C. Hon, B. Xia, I. Stewart, and D. Fang, "Falls from height in the construction industry: A critical review of the scientific literature," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 13, no. 7, p. 638, 2016, doi: 10.3390/ijerph13070638.

[5] S. Konda, H. M. Tiesman, and A. A. Reichard, "Fatal traumatic brain injuries in the construction industry, 2003–2010," *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 59, no. 3, pp. 212–220, 2016, doi: 10.1002/ajim.22557.

[6] Y. Halabi *et al.*, "Causal factors and risk assessment of fall accidents in the U.S. construction industry: A comprehensive data analysis (2000–2020)," *Safety Science*, vol. 145, p. 105537, 2022, doi: 10.1016/j.ssci.2021.105537.

[7] S. Jung *et al.*, "Epidemiology of occupational injuries in construction workers between 2009 and 2018 in South Korea," *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 66, no. 2, pp. 155–166, 2022, doi: 10.1002/ajim.23448.

[8] T. Nowobilski and B. Hoła, "Methodology based on causes of accidents for forecasting the effects of falls from scaffoldings using the construction industry in Poland as an example," *Safety Science*, vol. 157, p. 105945, 2023, doi: 10.1016/j.ssci.2022.105945.

[9] A. D. Rafindadi *et al.*, "Data mining of the essential causes of different types of fatal construction accidents," *Heliyon*, vol. 9, e13389, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13389.

[10] M. A. Camino López, D. O. Ritzel, I. Fontaneda González, and O. J. González Alcántara, "Occupational accidents with ladders in Spain: Risk factors," *Journal of Safety Research*, vol. 42, no. 5, pp. 391–398, 2011, doi: 10.1016/j.jsr.2011.08.003.

[11] M. Sawicki and M. Szóstak, "Quantitative assessment of the state of threat of working on construction scaffolding" *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 16, p. 5773, 2020, doi: 10.3390/ijerph17165773.

[12] M. Fujii *et al.*, "Factors influencing the injury severity score and the probability of survival in patients who fell from height," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 15561, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-95226-w.

[13] C. Palacio *et al.*, "Incidence of fall-from-height injuries and predictive factors for severity," *Journal of Osteopathic Medicine*, vol. 125, no. 5, pp. 229–236, 2025, doi: 10.1515/jom-2024-0158.

[14] A. A. Kiadaliri, B. E. Rosengren, and M. Englund, "Fall-related mortality in southern Sweden: A multiple cause of death analysis, 1998–2014," *Injury Prevention*, vol. 25, no. 2, pp. 129–135, 2019, doi: 10.1136/injuryprev-2017-042425.

[15] S. N. Min, M. Subramaniyam, S. J. Park, and K. S. Lee, "Development of the fall prevention index on the movable scaffold for construction workers," *Work*, vol. 65, no. 1, pp. 167–173, 2020, doi: 10.3233/WOR-193070.

[16] International Labour Organization (ILO), *Safe and Healthy Working Environment: Principles and Implementation*, Geneva: ILO, 2022. [Online]. Available: https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%40ed_dialogue/%40lab_admin/documents/publication/wcms_851909.pdf

[17] S. Abbaszadeh *et al.*, "Risk assessment of probable human errors in the scaffold erection and dismantling procedure: A fuzzy approach," *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, vol. 28, no. 3, pp. 1773–1778, 2022, doi: 10.1080/10803548.2021.1932110.

[18] M. Abbasinia and I. Mohammadfam, "Identifying, evaluating and prioritizing the causes of occupational accidents in the construction industry using fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS," *Work*, vol. 72, no. 3, pp. 933–940, 2022, doi: 10.3233/WOR-210024.

[19] Z. Ashuro *et al.*, "Prevalence of work-related injury and its determinants among construction workers in Ethiopia: A systematic review and meta-analysis," *Journal of Environmental and Public Health*, p. 9954084, 2021, doi: 10.1155/2021/9954084.

[20] M. Kyung, S. J. Lee, C. Dancu, and O. Hong, "Underreporting of workers' injuries or illnesses and contributing factors: A systematic review," *BMC Public Health*, vol. 23, no. 1, p. 558, 2023, doi: 10.1186/s12889-023-15487-0.

[21] J. Johansson *et al.*, "Occupational safety in the construction industry," *Work*, vol. 64, no. 1, pp. 21–32, 2019, doi: 10.3233/WOR-192976.

[22] L. Ensslin, A. Gonçalves, S. R. Ensslin, and A. Dutra, "Bibliometric and systemic review of the state of the art of occupational risk management in the construction industry," *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, vol. 29, no. 3, pp. 1107–1120, 2023, doi: 10.1080/10803548.2022.2111893.

[23] A. R. Gómez-García, K. P. Córdova Falconí, P. Merino-Salazar, and J. García-Arroyo, "Fatal work accidents in Ecuador from 2014 to 2020: How the age of the deceased worker relates to the accidents' temporal and geographical characteristics," *Archives of Environmental & Occupational Health*, vol. 78, no. 5, pp. 305–311, 2023, doi: 10.1080/19338244.2023.2196051.

[24] M. Paguay, J. D. Febres, and E. Valarezo, "Occupational accidents in Ecuador: An approach from the construction and manufacturing industries," *Sustainability*, vol. 15, no. 16, p. 12661, 2023, doi: 10.3390/su151612661.

[25] A. R. Gómez-García, R. Gutierrez-Álvarez, A. H. Chang-León, and J. A. García-Arroyo, "What activity is the most dangerous to work in? Estimation of the risk level of economic activities in Ecuador," *Safety and Health at Work*, vol. 16, no. 2, pp. 172–179, 2025, doi: 10.1016/j.shaw.2025.03.004.

[26] A. R. Gómez-García, "Commentary on the current situation of occupational injuries in the construction sector of Ecuador," *INGENIO*, vol. 7, no. 1, pp. 1–3, 2024, doi: 10.29166/ingenio.v7i1.5787.

[27] Ministerio del Trabajo, *Acuerdo Ministerial Nro. MDT-2025-122. Reglamento de seguridad en el trabajo y prevención de riesgos laborales para la construcción y obras públicas y privadas*, Quito: Gobierno del Ecuador, 2025. [Online]. Available: https://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2025/09/Acuerdo-Ministerial-Nro.-MDT-2025-122-signed.pdf

[28] K. J. Rauscher, C. W. Runyan, and D. Radisch, "Using death certificates and medical examiner records for adolescent occupational fatality surveillance and research: A case study," *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 9, no. 10, pp. 609–615, 2012, doi: 10.1080/15459624.2012.713764.

[29] R. Lilley *et al.*, "Decade of fatal injuries in workers in New Zealand: Insights from a comprehensive national observational study," *Injury Prevention*, vol. 27, no. 2, pp. 124–130, 2021, doi: 10.1136/injuryprev-2020-043643.

[30] S. Massari *et al.*, "Occupational mortality matrix: A tool for epidemiological assessment of work-related risk based on current data sources," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 9, p. 5652, 2022, doi: 10.3390/ijerph19095652.

[31] T. Kimura, M. Sasaki, and T. Hattori, "Estimation of the mortality rate of workers in Japan," *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, vol. 17, no. 1, p. 24, 2022, doi: 10.1186/s12995-022-00365-z.

[32] M. M. Richey *et al.*, "Trends in fatal occupational injuries in Latino/a workers relative to other groups, North Carolina 2000–2017," *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 65, no. 4, pp. 242–247, 2022, doi: 10.1002/ajim.23331.

[33] F. G. Benavides, A. Vives, M. Zimmerman, and M. Silva-Peñaherrera, "Exceso de mortalidad en población en edad de trabajar en nueve países de Latinoamérica, año 2020," *Revista Panamericana de Salud Pública*, vol. 46, e75, 2022, doi: 10.26633/RPSP.2022.75.

[34] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), *Portal de Datos Abiertos del Ecuador*, Gobierno del Ecuador, 2025. [Online]. Available: https://www.datosabiertos.gob.ec/dataset

[35] R. Lilley *et al.*, "Identifying opportunities to prevent work-related fatal injury in New Zealand using 40 years of coronial records: Protocol for a retrospective case review study," *Injury Epidemiology*, vol. 6, p. 16, 2019, doi: 10.1186/s40621-019-0193-z.

[36] International Labour Organization (ILO), *Methodologies for the Collection and Analysis of Data on Occupational Accidents*, Regional Office for Latin America and the Caribbean, 2021. [Online]. Available: https://vzf.ilo.org/wp-content/uploads/2021/06/wcms_794841.pdf

[37] J. Rochon, M. Gondan, and M. Kieser, "To test or not to test: Preliminary assessment of normality when comparing two independent samples," *BMC Medical Research Methodology*, vol. 12, p. 81, 2012, doi: 10.1186/1471-2288-12-81.

[38] C. Fan and D. Zhang, "A note on power and sample size calculations for the Kruskal–Wallis test for ordered categorical data," *Journal of Biopharmaceutical Statistics*, vol. 22, no. 6, pp. 1162–1173, 2012, doi: 10.1080/10543406.2011.578313.

[39] The jamovi project, *jamovi (Version 2.3.21.0) [Computer software]*, 2025. [Online]. Available: https://www.jamovi.org

[40] Y. V. Chudasama *et al.*, "Estimates of years of life lost depended on the method used: Tutorial and comparative investigation," *Journal of Clinical Epidemiology*, vol. 150, pp. 42–50, 2022, doi: 10.1016/j.jclinepi.2022.06.012.

[41] A. R. Gómez-García, C. H. Tsao Wu, E. N. Ruiz Barzola, and A. H. Hacay Chang, "Social burden and economic cost estimation of fatal injuries in workers affiliated to social security in Ecuador: A shared challenge in public and occupational health," *Revista de Investigación e Innovación en Ciencias de la Salud*, vol. 7, no. 2, 2025, doi: 10.46634/riics.390.

[42] M. Hollander, D. A. Wolfe, and E. Chicken, *Nonparametric Statistical Methods*, Wiley Series in Probability and Statistics, 2015, doi: 10.1002/9781119196037.

[43] A. R. Gómez-García, M. L. Vega Chica, and J. A. García-Arroyo, "Relationship between the territorial distribution of labor inspectors and work accident injuries: Clustering Ecuadorian provinces into four management scenarios," *Safety Science*, vol. 158, p. 105956, 2023, doi: 10.1016/j.ssci.2022.105956.

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

INGENIO
2026, VOL 9(1), ENERO - JUNIO, PP. 066-071

REVISTA INGENIO

Impacto de Fuentes Renovables en la Frecuencia del Sistema de Potencia

Impact of Renewable Sources on the Power System Frequency

Jorge Guillermo Calderón Guizar | Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias Análisis de Redes (México)

Recibido: 17/10/2025
Recibido tras revisión: 30/10/2025
Aceptado: 5/11/2025
Publicado: 28/1/2026

PALABRAS CLAVE
Fuentes renovables, frecuencia del sistema de potencia, generación síncrona.

RESUMEN
Con el propósito de reducir el impacto ambiental provocado por el uso de combustibles fósiles para generar energía eléctrica, la integración masiva de fuentes de generación renovable, eólica y fotovoltaica, en los sistemas eléctricos de potencia es la alternativa dominante a nivel mundial tanto para satisfacer el incremento natural de la demanda como para reemplazar las fuentes de generación síncrona o generación convencional. Una característica de estas fuentes de generación renovable es la nula inercia rotacional que aportan al sistema eléctrico comparadas con las fuentes de generación síncrona, lo que causa una pérdida de robustez en los sistemas de potencia. Esto provoca que la frecuencia en los sistemas eléctricos de potencia actuales sea más sensible a las contingencias normales que ocurren en su operación diaria. El presente artículo muestra de manera clara como el desplazamiento de generación síncrona por generación fotovoltaica provoca que ante una pérdida de generación en el sistema eléctrico la caída de frecuencia sea más drástica comparada con el caso en que la demanda se satisface solo con generación síncrona.

KEY WORDS
Renewable sources, power system frequency, synchronous generation.

ABSTRACT
Aiming to reduce the negative impact on the environment caused by the use of fossil fuels for electricity generation, the electric industry worldwide is incorporating renewable sources, mainly wind and photovoltaic power plants, to satisfy the natural increase on the electricity demand and as a replacement of synchronous generating sources. As a result, of this massive incorporation of wind and photovoltaic power plants, the power systems are becoming less robust due to the null rotational inertia contribution to the system by these type of sources. Thus, the frequency in nowadays power systems is more sensitive to the contingencies that usually occur during the daily operation of the system. This paper reports the impact on the system's frequency due to a loss of generation when photovoltaic power plants replace synchronous generation power plants. The results show clearly how the replacement of synchronous generation by photovoltaic power plants results in a higher frequency drop.

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que el crecimiento de la demanda de energía eléctrica a nivel mundial en el 2024 fue de un 4.3%, un incremento aproximado del 1.8% mayor que el experimentado durante el 2023. Mientras que la generación de electricidad a nivel mundial durante el 2024 superó los 1200 TWh, aproximadamente el 75% de dicha generación está asociada con fuentes de energía renovables y se considera que las centrales fotovoltaicas contribuyeron con 480 TWh [1]. En el pasado, el crecimiento de la generación de energía eléctrica para satisfacer el incremento natural de la demanda se asociaba con un aumento de generadores síncronos interconectados al sistema eléctrico de potencia [2]. Sin embargo, la tendencia actual de privilegiar la interconexión de fuentes de energías renovables sobre las fuentes de generación convencional [3, 4] provoca una

https://doi.org/10.29166/ingenio.v9i1.8944
2025 Universidad Central del Ecuador
CC BY-NC 4.0 —Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional
pISSN 2588-0829
eISSN 2697-3243
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

reducción en la inercia rotacional de los sistemas eléctricos de potencia [5] tornándolos menos robustos debido a que las fuentes de energía renovables son interconectadas al sistema de transmisión a través de dispositivos de electrónica de potencia. Como consecuencia de la reducción en la inercia rotacional de los sistemas eléctricos de potencia actuales, la capacidad de estos para mantener la frecuencia del sistema dentro de límites operativos adecuados, ante la ocurrencia de contingencias típicas durante su operación diaria, ha disminuido también. Lo cual a su vez ha provocado, que la rapidez de cambio de la frecuencia (RoCoF) por sus siglas en inglés (Rate of Change of Frequency) se incremente [6, 7], ocasionando que los operadores del sistema tengan que realizar acciones cada vez más complejas a fin de mantener la operación estable del sistema [7]. Esto es, la frecuencia en sistemas con una participación importante de fuentes de generación fotovoltaica y eólica sea más sensible y experimente desviaciones mayores durante una contingencia con respecto al comportamiento que exhibe ante la misma contingencia si el sistema opera con una nula participación de este tipo de fuentes de generación.

El objetivo de este trabajo, es presentar de manera clara la pérdida de robustez de los sistemas eléctricos de potencia cuando fuentes de energías renovable como la fotovoltaica desplazan centrales de generadores síncronos en un sistema eléctrico de potencia. Para lograr este propósito se utiliza una versión modificada del sistema de prueba de 9 buses y 3 generadores [8]. Los resultados que se reportan se obtuvieron haciendo uso del demo del software PowerWorld [9].

2. METODOLOGÍA

2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO

Desde el punto de vista de la física, el concepto de inercia se interpreta como la característica o propiedad inherente a un objeto que evita se modifique su condición de reposo o movimiento, si su condición inicial no es modificada por una acción o fuerza externa. Esto es, la tendencia natural de un objeto a permanecer en su condición inicial de reposo o movimiento.

2.1.1 Inercia en el Sistema de Potencia

En el sistema eléctrico de potencia la principal fuente de inercia se asocia con las masas rotatorias de las diversas componentes que en el existen. Por ejemplo, los rotores de los generadores síncronos, de las turbinas de dichos generadores y de los motores. El término inercia en un sistema de potencia se vincula con la energía almacenada en las masas rotatorias del sistema y esta energía cinética almacenada resulta imprescindible para atenuar las desviaciones de frecuencia en el sistema cuando ocurren eventos o contingencias que provocan desbalances entre la demanda y generación del sistema. Se infiere entonces que entre mayor sea la capacidad de generación convencional sincronizada al sistema de potencia mayor será la capacidad de este para almacenar energía cinética, lo cual le permitirá, en condiciones de contingencia, experimentar desviaciones importantes en la frecuencia.

2.1.2 Ecuación de Oscilación del Generador Síncrono

Esta ecuación relaciona el movimiento del rotor del generador con el campo magnético del estator del generador síncrono. Es una ecuación diferencial no-lineal de segundo orden y vincula la constante de inercia del generador con las potencias mecánica y eléctrica del mismo. Una expresión típica de la ecuación de oscilación, es la que se muestra a continuación;

$$J\omega_m = \frac{d^2\delta}{dt^2} = M\frac{d^2\delta}{dt^2} = 2H\frac{d^2\delta}{dt^2} = 2H\frac{d\omega_e}{dt} = P_m - P_e \qquad (1)$$

Donde;

J es el momento de inercia de todas las masas rotatorias acopladas al rotor.

ω_m es la velocidad angular mecánica del rotor.

δ es la posición angular del rotor respecto al marco de referencia síncrono.

ω_e es la velocidad angular eléctrica del rotor.

t es el tiempo.

M es el momento angular del rotor a velocidad nominal.

H es la constante de inercia del generador.

P_m es la potencia mecánica.

P_e es la potencia eléctrica.

El sistema eléctrico de potencia consta de varios generadores síncronos, por lo que resulta conveniente conocer la inercia equivalente del sistema en función del número de generadores sincronizados al sistema. Una manera de estimar el valor de la inercia equivalente del sistema es mediante el uso de la Ecuación 2 [10];

$$H_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n} H_i S_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i} \qquad (2)$$

Donde;

H_{eq} es la constante de inercia equivalente total del sistema de potencia.

H_i es la constante de inercia del i-ésimo generador sincronizado al sistema de potencia.

S_i es la capacidad nominal del i-ésimo generador sincronizado al sistema de potencia.

n es el número de generadores sincronizados al sistema de potencia.

La frecuencia del sistema eléctrico de potencia se asume como una variable global del sistema. Sin embargo, es el promedio de las frecuencias asociadas con cada uno de los generadores sincronizados al sistema. Esto es, durante la ocurrencia de un disturbio en el sistema de potencia este opera de manera asíncrona provocando que existan

distintos valores de frecuencia en diferentes zonas o áreas del sistema.

La ecuación 1, permite deducir que el comportamiento de la velocidad angular eléctrica o frecuencia es dependiente del balance entre la potencia mecánica suministrada por el primo-motor al generador y la potencia eléctrica que el generador entrega al sistema de potencia. Luego entonces, se in ere que el comportamiento de la frecuencia del sistema de potencia es resultado del bala o desbalance entre los totales de la demanda y genera del sistema en cada instante de tiempo.

Con el propósito de evaluar en forma cualitativa e efecto de reemplazar generadores síncronos por centra fotovoltaicas, resulta conveniente considerar una repr sentación matemática simpli cada del sistema eléctrico potencia en la que la dependencia entre la frecuencia sistema y el balance entre la demanda y generación del tema se exprese de manera explícita. Esta representa simpli cada del sistema de potencia, agrupa a todas l fuentes de generación en una sola fuente y todas las cargas eléctricas del sistema en una sola demanda. La constante de inercia equivalente de la fuente se determina usando la Ecuación 2. Luego entonces, la relación matemática que describe la dinámica de esta representación aproximada del sistema está dada por la Ecuación 3.

$$\frac{d\omega_{sys}}{dt} = 2\pi \frac{df_{sys}}{dt} = \frac{1}{2H_{eq}}(P_G - P_D) \qquad (3)$$

Donde;

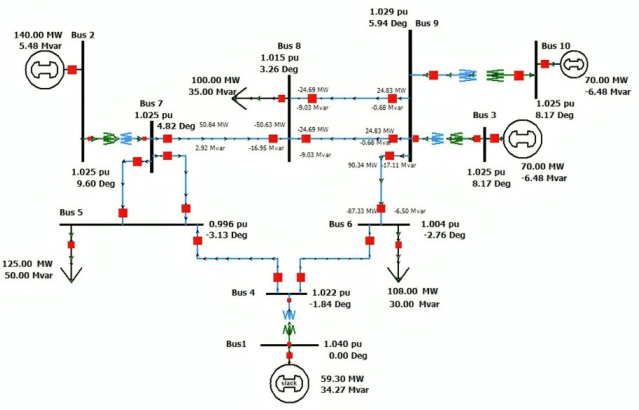
ω_{sys} es la velocidad angular eléctrica del sistema.
f_{sys} es la frecuencia eléctrica del sistema.
P_G es la generación total del sistema.
P_D es la demanda total del sistema.

El análisis de la ecuación 2 permite deducir fácilmente que entre menor sea el número y capacidad de los generadores síncronos conectados al sistema de potencia, menor será la inercia equivalente total del sistema. Mientras que el análisis de la ecuación 3 revela que entre menor sea el valor de la inercia equivalente del sistema la rapidez de cambio de la frecuencia (RoCoF) del sistema será mayor ante un desbalance entre la demanda y generación del sistema.

2.2. MÉTODO Y CASOS DE ESTUDIO

Con el propósito de hacer énfasis en el impacto que tiene el reemplazar unidades de generación síncrona por centrales de generación fotovoltaica sobre el comportamiento de la frecuencia en el sistema eléctrico de potencia, ante la ocurrencia de contingencias comunes, durante la operación diaria de estos, se compara el comportamiento de la frecuencia del sistema cuando el total de la generación del sistema de prueba, cuya topología y condición de operación se muestran en la g. 1, es suministrada por generadores síncronos contra el comportamiento que exhibe la frecuencia cuando la central convencional conectada al bus 2, aproximadamente el 41.2 % de la generación total, se reemplaza por una central fotovoltaica.

Fig. 1.
Diagrama unifilar y condición de operación del sistema de prueba



2.2.1. Caso de estudio 1

En este caso de estudio la demanda total del sistema es suministrada por centrales de generación que contienen únicamente generadores síncronos y las protecciones por baja frecuencia en las cargas se encuentran deshabilitadas. La contingencia considerada es la pérdida súbita de la generación conectada al bus 3.

2.2.2. Caso de estudio 2

Al igual que en el caso de estudio 1, la demanda total del sistema es suministrada por centrales de generación que contienen únicamente generadores síncronos, las protecciones por baja frecuencia en las cargas se encuentran habilitadas y operan de la siguiente manera: si la frecuencia en cada centro de carga permanece por debajo de los 59.4 Hz durante al menos 15 ciclos se desconecta el 10% de la demanda y si la frecuencia permanece por debajo de los 59.2 Hz durante al menos 15 ciclos se desconecta un 10% adicional de la demanda, con el propósito de mitigar la caída de la frecuencia del sistema provocada por la contingencia. La contingencia considerada es la pérdida súbita de la generación conectada al bus 3.

2.2.3. Caso de estudio 3

En este caso de estudio la central de generación conectada al bus 2 es del tipo fotovoltaico y el resto de las centrales contienen únicamente generadores síncronos y las protecciones por baja frecuencia en las cargas se encuentran deshabilitadas. La contingencia considerada es la pérdida súbita de la generación conectada al bus 3.

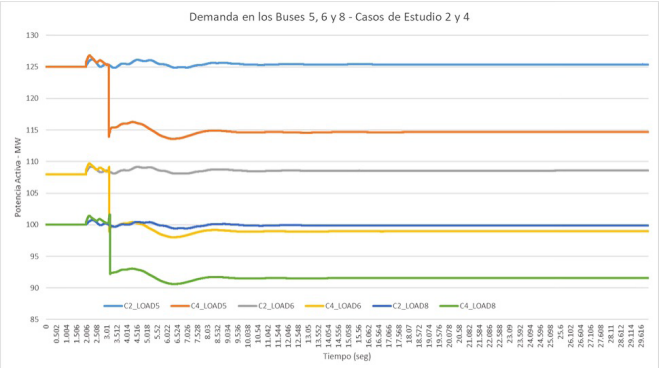
2.2.4. Caso de estudio 4

Al igual que en el caso de estudio 2, la central de generación conectada al bus 2 es del tipo fotovoltaico y el resto de

centrales de generación contienen únicamente generadores síncronos, las protecciones por baja frecuencia en las cargas se encuentran habilitadas y operan de la siguiente manera: si la frecuencia en cada centro de carga permanece por debajo de los 59.4 Hz durante al menos 15 ciclos se desconecta el 10% de la demanda y si la frecuencia permanece por debajo de los 59.2 Hz durante al menos 15 ciclos se desconecta un 10% adicional de la demanda, con el propósito de mitigar la caída de la frecuencia del sistema provocada por la contingencia. La contingencia considerada es la pérdida súbita de la generación conectada al bus 3.

Fig. 3.

Comportamiento de la demanda eléctrica en los buses 5, 6 y 8

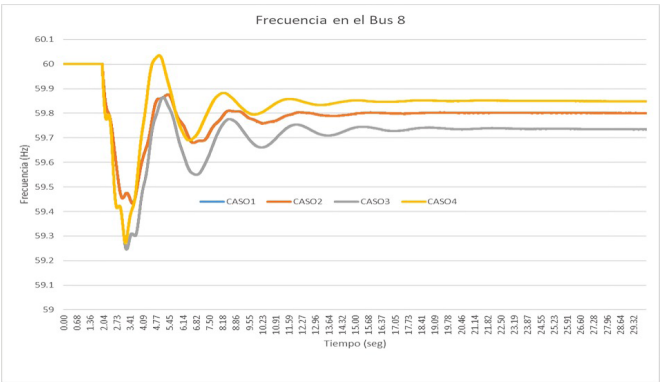


3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados más relevantes que permiten identificar de manera clara el impacto que tiene la reducción de la inercia equivalente del Sistema eléctrico de potencia como resultado del reemplazo de centrales de generadores síncronos por centrales fotovoltaicas se muestran en las guras asociadas con comportamiento de la frecuencia, la demanda de los centros de carga la potencia de generación de las centrales del sistema de prueba considerado. A partir del comportamiento de la frecuencia en el bus 8 mostrado en la Fig. 2, para todos los casos de estudio simulados en cuando todas las centrales en el sistema contienen únicamente generadores síncronos (casos de estudio 1 y 2) el mínimo valor que alcanza la frecuencia después de ocurrida la contingencia es mayor que cuando la central síncrona conectada al bus 2 es reemplazada por una central de generación fotovoltaica (casos de estudio 3 y 4).

Fig. 2.

Frecuencia en el bus 8 – Casos de Estudio 1, 2, 3 y 4



Se in ere también que en ninguno de los casos de estudio 1 y 2 la frecuencia alcanza el valor 59.4 Hz que es el valor de activación de la protección de disparo de carga. Sin embargo, en los casos de estudio 3 y 4 la frecuencia permanece por debajo de 59.4 Hz el tiempo su ciente para que opera dicha protección cuando se encuentra activa como en el caso de estudio 4. La Fig. 3 muestra claramente como esta protección opera y reduce la carga en los buses 5, 6 y 8.

Las Fig. 4 y Fig. 5 muestran el comportamiento de la potencia activa de las centrales generadoras del sistema para los casos de estudio 2 y 4 respectivamente.

Fig. 4.

Potencia que entregan al sistema las centrales generadoras – Caso de estudio 2

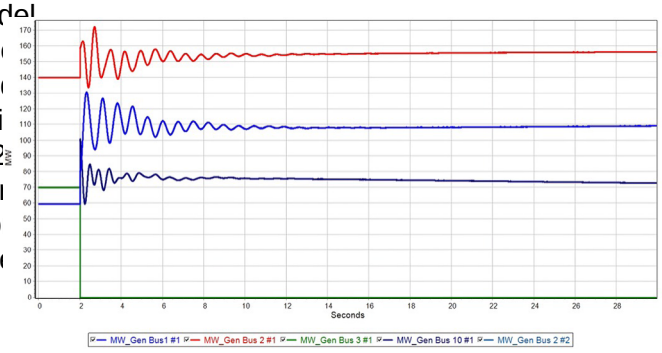
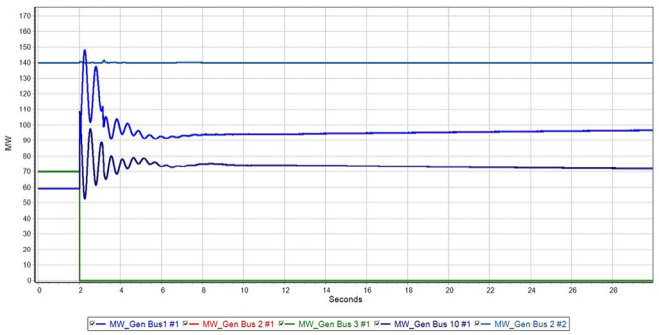


Fig. 5.

Potencia que entregan al sistema las centrales generadoras – Caso de estudio 4



Comparando el comportamiento de la potencia que aporta cada una de las centrales del sistema durante los casos de estudio 2 y 4, se in ere claramente que la central conectada al bus 2 en el caso de estudio 2 incrementa la magnitud de la potencia que entrega al sistema en el mismo instante en que ocurre la pérdida de la central de generación conectada al bus 3, con el propósito de

reestablecer el balance entre la generación y la demanda en el sistema eléctrico de potencia. Este comportamiento ocurre también con la potencia de las otras centrales que permanecen en operación. Por otro lado, en el caso de estudio 4 esta no experimenta variación alguna en la magnitud de la potencia que entrega al sistema a pesar de la pérdida de generación experimentada por el sistema, como lo muestra la curva asociada con la potencia que entrega la central conectada al bus 3. Mientras que las centrales conectadas a los buses 1 y 10 si incrementan la magnitud de la potencia que entregan al sistema para mitigar el desbalance entre la demanda y generación del sistema eléctrico de potencia.

El incremento en la magnitud de la potencia que las centrales generadoras aportan al sistema eléctrico al ocurrir la contingencia está asociado con la transformación de la energía cinética almacenada en los rotores de los generadores, en energía eléctrica a costa de reducir su velocidad de rotación cuyo efecto se manifiesta como una reducción en la frecuencia del sistema. En los casos de estudio 3 y 4, caída de frecuencia es mayor que en los casos de estudios 1 y 2 porque la central fotovoltaica que reemplaza a la central convencional (generadores síncronos) no tiene la capacidad de almacenar energía cinética ya que por su naturaleza no cuenta con masas rotatorias (inercia) y en consecuencia al momento de ocurrir la contingencia está imposibilitada de incrementar su aportación de potencia al sistema de manera natural como sucede con los generadores síncronos.

4. CONCLUSIONES

Los casos de estudio analizados en el presente trabajo, muestran explícitamente la reducción de la inercia total del sistema eléctrico de potencia se asocia con la pérdida de robustez del mismo para mitigar las desviaciones de la frecuencia resultado de la ocurrencia de alguna contingencia.

Una razón de la reducción de la inercia total en los sistemas eléctricos de potencia es el reemplazo de centrales de generación convencionales (generadores síncronos) por centrales de fuentes renovables, fotovoltaicas en el caso del presente trabajo.

La reducción de la inercia total del sistema provoca desviaciones mayores en la frecuencia cuando se presentan desbalances entre la demanda y generación del sistema y puede provocar la operación de las protecciones de deslastre de carga por baja frecuencia con la consecuente afectación de usuarios.

Finalmente, en relación con el Demo de PowerWorld utilizado para la simulación de los casos de estudio reportados en el presente trabajo, a pesar de su limitada capacidad para simular redes de gran tamaño es una herramienta útil para la simulación y comprensión del impacto que sobre los sistemas eléctricos de potencia tiene la integración de nuevas tecnologías, ya que el detalle con el que permite modelar las componentes del sistema de potencia es el mismo que ofrece la versión profesional del mismo.

REFERENCIAS

[1] International Energy Agency – Global Energy Review 2025. Disponible: https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b169aa1-bc88-4c96-b828-aaa50406ba80/GlobalEnergyReview2025.pdf

[2] C. P. Steinmetz, “Power Control and Stability of Electric Generating Stations”, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers XXXIX, (1920) no. 2, 1215-1287. Disponible: https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1920.4765322

[3] R. P. Jiménez, C. A. Platero, M. E. Sánchez y E. R. Barneto, “Synchronous Condenser for European Grid Code Compliance: A Case Study of a PV Power Plant in Spain”, IEEE Access, vol. 11, pp. 54713 – 54723, 2023. Disponible: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3281532

[4] H. Holttinen, J. Kiviluoma, D. Flynn, J. C. Smith, A. Orths, P. B. Eriksen, N. Cutululis, L. Söder, M. Korpås, A. Estanqueiro, J. MacDowell, A. Tuohy, T. K. Vrana y Mark O’Malley, “System Impact Studies for Near 100% Renewable Energy Systems Dominated by Inverter Based Variable Generation”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 37, no. 4, July 2022, pp. 3249 – 3258. Disponible: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3034924

[5] S. Gordon, C. McGarry, J. Tait y Keith Bell, “Impact of Low Inertia and High Distributed Generation on the Effectiveness of Under Frequency Load Shedding Schemes”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 37, no. 5, October 2022, pp. 3752 – 3761. Disponible: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3137079

[6] A. Fernández-Guillamón, E. Gómez-Lázaro, E. Muljadic y Á. Molina-García, “Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 115, November 2019. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109369

[7] M. I. Saleem, S. Saha, y T. K. Roy, “Inertia Sensitivity Analysis of Power Grids With High Penetration of Renewable Energy Sources”, IEEE Transactions on Industry Applications, 61, (2025), no. 4, 5362-5380. Disponible: https://doi.org/10.1109/IAS54023.2022.9940079

[8] P. M. Anderson and A. A. Fouad, “Power System Control and Stability”, Wiley-IEEE Press, p. 38, 2003. Disponible: https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=5264012

[9] PowerWorld Corporation, Demo Software, Disponible: https://www.powerworld.com/download-purchase/demo-software

[10] A. Pepiciello, A. Vaccaro, D. Villacci y F. Milano, "A Method to Evaluate the Inertial Response of Frequency Controlled Converter-Interfaced Generation", 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Disponible: https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160784

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

INGENIO
2026, VOL 9(1), ENERO - JUNIO, PP. 072-088

REVISTA INGENIO

Evaluación Estructural del Edificio de Administración de Ingeniería química de la Universidad Central del Ecuador Aplicando la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 (NEC15)

Structural assessment of the Chemical Engineering Administration Building at Universidad Central Applying the Ecuadorian Building Code (NEC15)

Ing. Alejandra Estefanía Siguenza Flores | Universidad Central del Ecuador, UCE Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (Ecuador)
Ing. Diego Paúl Sunta Zapata | Universidad Central del Ecuador, UCE Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (Ecuador)
MSc. Luis Alejandro Machado Salazar | Universidad Central del Ecuador, UCE Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (Ecuador)
MSc. Juan Gabriel Barros López | Universidad Central del Ecuador, UCE Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (Ecuador)

Recibido: 8/9/2025
Recibido tras revisión: 24/10/2025
Aceptado: 10/11/2025
Publicado: 28/1/2026

PALABRAS CLAVE
Análisis Estructural, Ensayos No Destructivos, Periodo de Vibración, Pushover, Curva de Capacidad.

RESUMEN
El presente proyecto evalúa la vulnerabilidad sísmica del edificio de Administración de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, utilizando la norma ecuatoriana de la construcción (NEC). Dado que el edificio tiene 11 años y fue construida en una etapa normativa transitoria, se considera necesario analizar su comportamiento estructural ante sismos severos. Para ello, se aplicaron ensayos no destructivos como esclerometría (ASTM C-805) para estimar la resistencia del hormigón y pachometría para ubicar el refuerzo de acero. También se utilizó el ensayo de vibración ambiental para obtener el período fundamental del edificio, el cual fue comparado con los resultados del análisis modal espectral de un modelo estructural desarrollado en software especializado. Este modelo fue calibrado incorporando diagonales equivalentes que simulan la rigidez de la mampostería. Finalmente, se realizó un análisis estático no lineal (Pushover), empleando el método del espectro de capacidad (FEMA 440), con el objetivo de obtener la curva de capacidad y determinar el nivel de desempeño estructural. Los resultados obtenidos permiten conocer el estado actual del edificio y brindan información clave para decidir sobre su uso futuro o la necesidad de intervenciones de refuerzo.

KEY WORDS
Structural Analysis, Non-Destructive Testing, Vibration Period, Pushover, Capacity Curve.

ABSTRACT
This research project focuses on the structural evaluation of the Administration Building of the Faculty of Chemical Engineering at the Central University of Ecuador, emphasizing its seismic vulnerability in accordance with the Ecuadorian Construction Standard (NEC). The building, in operation for 11 years, was built during a transitional regulatory period, making it essential to assess its behavior under severe seismic events. The methodology includes non-destructive tests such as the rebound hammer test (ASTM C-805) to determine concrete strength, and pachometry to locate steel reinforcement. Ambient vibration testing was used to determine the building's actual fundamental period, which was compared with the results of a modal spectral analysis using structural modeling software. The model was calibrated by incorporating equivalent diagonals to represent the stiffness of existing masonry. Finally, a nonlinear static analysis (Pushover) was conducted using the capacity spectrum method (FEMA 440), enabling the development of the capacity curve and evaluation of structural performance levels. The findings provide insight into the current condition of the structure and offer valuable input for institutional decision-making regarding its continued use or potential retrofitting.

1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería estructural juega un rol crítico en la mitigación de los efectos sísmicos, una necesidad imperiosa en regiones de constante actividad tectónica como Ecuador. Autores como Díaz Méndez y Moscoso Vázquez enfatizan que un análisis riguroso y la modelación estructural son esenciales para prever la capacidad de las estructuras. Este enfoque es fundamental para la seguridad y funcionalidad de las edificaciones, especialmente en contextos sensibles como las instalaciones educativas [1].

La actividad sísmica global se origina en procesos geológicos como la subducción, donde una placa tectónica se

https://doi.org/10.29166/ingenio.v9i1.8703
2025 Universidad Central del Ecuador
CC BY-NC 4.0 —Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional
pISSN 2588-0829
eISSN 2697-3243
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

desliza bajo otra, liberando grandes cantidades de energía en forma de terremotos [2]. Si bien estas fuerzas naturales son inevitables, su impacto en las construcciones puede reducirse significativamente mediante un diseño estructural adecuado.

Ecuador, ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, experimenta eventos sísmicos recurrentes debido a la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana [3]. Este alto riesgo geológico subraya la necesidad de adherirse a normativas estrictas, como la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 (NEC-15), para el diseño y la evaluación de estructuras.

El presente estudio se centra en el Edificio de Administración de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, una estructura con más de diez años de servicio. El objetivo es realizar una evaluación detallada de su desempeño estructural antisísmico. Para ello, se emplearán metodologías contemporáneas, incluyendo ensayos no destructivos y análisis no lineal, para identificar vulnerabilidades y, en caso de ser necesario, proponer soluciones técnicas para su reforzamiento estructural.

2. MÉTODO

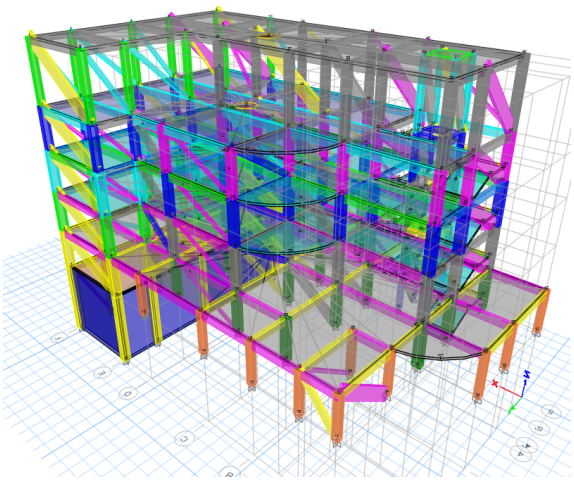
Fig. 1.

Facultad de Ingeniería Química UCE

Nota. Tomado de Google imágenes [4]

Fig. 2

Modelado 3D: Edificio Administrativo FIQ



Para realizar una evaluación integral del edificio, se adoptó una metodología dividida en distintas fases:

2.1. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN

Antes de realizar el análisis estructural, se llevó a cabo una recopilación de información documental y técnica:

- Planos arquitectónicos y estructurales: Se verificaron los planos del edificio para conocer su configuración estructural y los materiales utilizados.
- Visitas técnicas: Se realizó una inspección visual del edificio para detectar posibles daños o irregularidades.
- Normativa aplicada: Se empleó la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 (NEC-2015)

2.2. OPTIMIZACIÓN DEL MUESTREO: NÚMERO Y UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS POR ELEMENTO (ASCE41-17)

Para garantizar una evaluación representativa de la resistencia a la compresión del hormigón sin comprometer la integridad estructural del edificio, se adoptó la metodología de muestreo establecida en ASCE 41-17, la cual define la cantidad mínima de ensayos requeridos en pruebas destructivas. Aunque el estudio se basa en ensayos no destructivos, se implementó esta metodología como referencia, considerando que proporciona un criterio confiable para la representatividad de los datos. En este sentido, se decidió aplicar al menos tres mediciones esclerométricas y escaneo magnético (Pachometría) por nivel, asegurando una caracterización adecuada de las propiedades mecánicas del hormigón en la estructura. Esta adaptación permite obtener resultados estadísticamente significativos dentro de un enfoque no invasivo, alineándose con estándares internacionales en la evaluación de edificaciones existentes.

La estrategia de muestreo fue validada por el laboratorio LEMSUR (EPN) y el Área del Laboratorio de resistencia de materiales de la facultad de ingeniería de la PUCE, garantizando la representatividad de los puntos seleccionados en cada nivel del edificio, en función de su distribución funcional y estructural. Se definieron 35 puntos de muestreo distribuidos en un edificio de cinco plantas y un subsuelo, abarcando elementos clave como columnas, vigas, losas y muros. Esta metodología se desarrolló en cumplimiento con los lineamientos establecidos por las normas ISO/IEC 17025 y ACI 318-83, que respaldan la aplicación de ensayos no destructivos in situ para la evaluación estructural.

El enfoque adoptado permitió capturar variaciones en la resistencia del hormigón debido a diferencias en el proceso constructivo, compactación y mezclado, garantizando resultados confiables con una distribución eficiente de los recursos técnicos y financieros.

2.3. EVALUACIÓN PRE-EVENTO (FEMA-154)

Se realizó una inspección visual rápida del edificio conforme a la metodología de FEMA P-154 [5] y lo establecido en la Resolución Nro. 008-CTUGS-2020 [6], con el objetivo de recopilar datos estructurales y categorizar su nivel de vulnerabilidad sísmica [7].

A partir del espectro de respuesta del sitio y los factores Fa, Fd y Fs según ASCE/SEI 41-13, se determinó que la edificación se encuentra en una zona de sismicidad moderadamente alta (1.12, 1.11 y 1.40). En función de estos valores, se utilizó el formulario correspondiente para la evaluación, cuyos resultados indicaron la necesidad de un análisis estructural más detallado.

2.4. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Para evaluar las propiedades mecánicas del edificio sin alterar su estructura, se realizaron los siguientes ensayos:

2.4.1. Esclerometría

El ensayo de número de rebote en concreto endurecido se llevó a cabo utilizando un martillo esclerométrico. Este método permitió evaluar la uniformidad de los elementos de concreto (columnas, vigas y losa) y estimar su resistencia en el sitio, a partir de la relación entre el número de rebote y la resistencia del material.

2.4.2. Pachometría o escaneo magnético (BS 1881-Part 204-88)

Se empleó el escaneo magnético para detectar la distribución y el diámetro de las barras de refuerzo en columnas, vigas y losas. Esto permitió verificar si la cantidad y disposición de acero es acorde con los planos estructurales originales.

2.4.3. Ensayo de vibración ambiental

Se utilizó un sismógrafo IGU-BD3C-5 para medir las frecuencias naturales del edificio. Este ensayo permitió determinar el periodo fundamental de vibración, el cual se comparó posteriormente con el modelo estructural.

2.4.3.1. Procedimiento de instalación

Para la medición de la respuesta estructural del edificio, se siguieron los siguientes pasos:

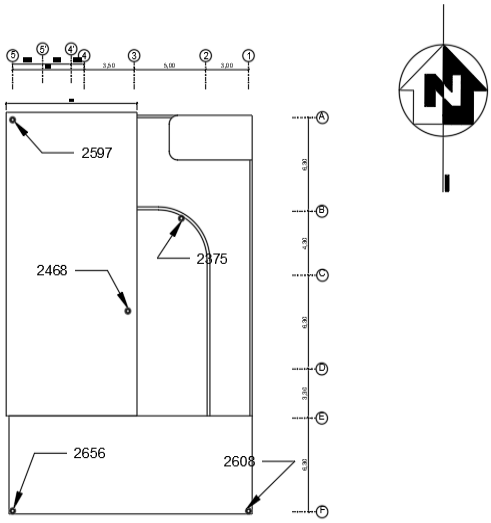
- **Fijación y nivelación de sensores:** Cada sensor fue colocado sobre bases niveladas para garantizar una medición precisa y minimizar errores en el registro.
- **Ubicación estratégica de sensores:** Se instalaron en la planta alta de la edificación, donde se presentan las mayores deformaciones, siguiendo un esquema de intersección de líneas perpendiculares para maximizar la cobertura del área.

Fig. 3.
Sismógrafos calibrados IGU-BD3C-5.

Fig. 4.
Ubicación de los sismógrafos.

- **Orientación de los ejes de referencia:** Se estableció la dirección de los ejes X (Norte) y Y (Este), alineando el eje Norte con la longitud mayor de la estructura. Los sensores se orientaron en función de esta referencia.

Fig. 5.
Fijación de los sismógrafos con perspectiva en planta.



- **Conexión al sistema de adquisición:** Los sensores se vincularon de forma inalámbrica mediante Bluetooth a un dispositivo Android con la aplicación Smart-Solo, que permitió el monitoreo en tiempo real.
- **Procesamiento de datos:** Posterior a la adquisición en campo, los registros fueron analizados para obtener la distribución de energía en el dominio de la frecuencia, facilitando la interpretación de la respuesta estructural.

Este procedimiento garantizó la precisión en la adquisición de datos y permitió un análisis confiable de la respuesta dinámica de la edificación.

Para el análisis sísmico y de vibraciones ambientales, se utilizó Geopsy, un software de uso libre ampliamente empleado en la ingeniería civil y geofísica. Este programa permite procesar registros de ruido ambiental y sismogramas, proporcionando herramientas para el cálculo de la Transformada de Fourier y la Densidad Espectral de Potencia (Power Spectral Density, PSD) [8]. El procesamiento de los datos adquiridos incluyó los siguientes pasos:

- **Importación de datos:** Los registros obtenidos con los sismógrafos se exportaron en formatos compatibles con Geopsy (SEED). Antes del procesamiento, se verificaron la duración, la tasa de muestreo y la coherencia de los canales [8].
- **Filtrado y correcciones:** Se aplicaron filtros de banda (0.1–20 Hz) para eliminar ruido indeseado y se realizaron correcciones básicas, como la eliminación de tendencias lineales y la corrección de señales saturadas.
- **Cálculo de la Densidad Espectral de Potencia (PSD):** Mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), se analizaron ventanas de tiempo seleccionadas dentro del registro. Se promediaron los resultados para obtener curvas representativas en coordenadas de PSD (counts^2/Hz) vs. Frecuencia (Hz), permitiendo identificar las frecuencias con mayor energía y los posibles modos propios de vibración de la estructura [8].
- Este procedimiento aseguró la precisión en la identificación de las características dinámicas del edificio, facilitando la validación de su comportamiento estructural.

Finalmente, el software permite la exportación de gráficos y datos en formato JPG.

2.5. MODELACIÓN ESTRUCTURAL

Para evaluar el comportamiento estructural del edificio, se realizó una modelación detallada utilizando software especializado. Se consideraron las características geométricas y mecánicas de los materiales, así como los efectos de elementos no estructurales, como la mampostería, mediante el método de diagonales equivalentes para ajustar la rigidez del modelo.

Además, dentro del proceso de modelación, se incluyó el análisis de las cargas laterales actuantes sobre el muro de contención en el subsuelo, dado su papel fundamental en la estabilidad de la estructura. Para ello, se consideraron los siguientes aspectos:

- **Determinación de presiones laterales del suelo:** Se calcularon los coeficientes de empuje en reposo y por cohesión del suelo, tomando en cuenta las propiedades geotécnicas del sitio y aplicando las ecuaciones correspondientes [9].
- **Aplicación del método de Boussinesq:** Se empleó para evaluar la distribución de esfuerzos inducidos por las cargas verticales de la estructura sobre el suelo, lo que permitió estimar su efecto sobre el muro de contención [10].
- **Distribución de esfuerzos en el muro:** Se definieron puntos de control a distintas profundidades para calcular la presión lateral acumulada, con el fin de evaluar el comportamiento del muro ante las cargas aplicadas [11].

2.5.1. Ingreso de cargas en el modelo estructural

Para la modelación estructural del edificio, se ingresó las cargas conforme a la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), considerando los efectos de peso propio, sobrecarga y cargas laterales sobre el muro estructural.

- **Peso propio de la losa:** Se modeló como una losa maciza equivalente, con un peralte de 20 cm y aligeramientos de 40x40x15 cm, asegurando una distribución precisa de la carga.
- **Sobrecarga:** Se implementaron las sobrecargas mínimas uniformemente distribuidas según el Apéndice 4 y el inciso 4.2 de la NEC, considerando la ocupación y uso de la edificación.
- **Datos para la presión de empuje de suelo:** Se utilizaron los datos del Estudio de Mecánica de Suelos de la Universidad Central del Ecuador, caracterizando la zona S2 con depósitos de cangagua y lacustres. Se incorporaron las siguientes cargas laterales:
- **Presión de empuje del suelo:** Se aplicó como una carga triangular, obtenida con la ecuación establecida por Braja Das [9]:

Ec. 1

Presión lateral a una profundidad Z [9]

$$\sigma_h = K_o * \gamma' * z \tag{1}$$

- **Presión de cohesión:** En suelos cohesivos, se modeló como una carga rectangular uniforme que reduce la presión lateral [9].

Ec. 2

Presión lateral del suelo con efectos de cohesión

$$\sigma_c = 2 * c * \sqrt{K_o} \quad (2)$$

- **Presión de sobrecarga:** Se determinó a partir de las reacciones de apoyo generadas por la estructura, distribuyéndola horizontalmente sobre el muro según la interacción suelo-estructura.

    - El ingreso de estas cargas se realizó posterior a la definición de propiedades geométricas y mecánicas de los materiales, incluyendo hormigón, acero, vigas, losas y columnas, asegurando una representación fiel del comportamiento estructural del edificio.

2.5.1.1. Metodología de cálculo de sobrecarga (Muro estructural):

Para analizar la interacción suelo-estructura y el comportamiento del muro de contención, se aplicó la teoría de Boussinesq para cargas puntuales, siguiendo los siguientes pasos:

- **Identificación de reacciones estructurales:** Se determinó las cargas verticales provenientes de los apoyos de la estructura que generan presiones en el terreno.
- **Distribución de esfuerzos en el suelo:** Se utilizó la teoría de Boussinesq para evaluar la transmisión lateral de estas cargas, determinando el incremento de presión en el suelo.
- **Definición de bulbos de presión:** Se modelaron las zonas de mayor concentración de esfuerzos para identificar las áreas del muro que soportan las mayores cargas.
- **Superposición de presiones:** Se sumaron las contribuciones de cada carga puntual en distintos puntos de control a lo largo del muro.
- **Monitoreo estructural:** Se estableció un punto de control principal en el eje E y se distribuyeron 17 puntos adicionales, espaciados cada 1 metro, para evaluar la variación de esfuerzos y la respuesta estructural del muro.

Este procedimiento facilitó una evaluación más precisa del vínculo entre el terreno (suelo) y la estructura, permitiendo representar con mayor fidelidad el desempeño del muro como parte integral del sistema estructural del edificio.

2.6. COMPARACIÓN DE PERIODOS DE VIBRACIÓN: MODELADO VS ENSAYO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL.

Posteriormente, se realizó una comparación entre el periodo obtenido del modelado y el determinado a través del ensayo de vibración ambiental.

2.7. DIAGONALES EQUIVALENTES- MAMPOSTERÍA

Para lograr que el modelo estructural se aproximara al comportamiento dinámico observado experimentalmente, se procedió a rigidizar la estructura mediante la implementación del modelo de diagonales equivalentes [12]. Esta metodología consistió en incorporar elementos diagonales inclinados que simulan el efecto de los muros de mampostería no estructural, aportando rigidez adicional al sistema sin modificar significativamente la geometría del modelo. La inclusión de estas diagonales permitió reproducir el confinamiento y la rigidez lateral que los muros generan en la estructura real, lo que facilitó ajustar el período fundamental del modelo a los valores obtenidos mediante el ensayo de vibración ambiental. De esta forma, se logró una mejor correlación entre el modelo numérico y el comportamiento dinámico observado, condición fundamental para avanzar hacia un análisis estático no lineal más preciso y representativo.

2.8. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)

Para evaluar la capacidad sísmica del edificio, se aplicó un análisis Pushover utilizando el método del espectro de capacidad (FEMA 440). Este análisis permitió determinar la curva de capacidad del edificio y su nivel de desempeño estructural ante eventos sísmicos.

2.8.1. Carga sísmica

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), en su capítulo sobre Peligro Sísmico, establece que las estructuras de ocupación especial deben verificar un desempeño sísmico adecuado en el rango inelástico, de modo que no colapsen bajo un sismo con un período de retorno de 2500 años (equivalente a una probabilidad anual de excedencia de 0,00004) [13].

- Para ingresar la carga sísmica en el software de análisis, resulta necesario calcular el espectro que caracteriza este sismo. Con ese fin, se emplean las curvas de peligro sísmico de la ciudad de Quito, suministradas por la propia NEC-SE-DS.

De los datos de la curva de peligro sísmico (anexo, fig. 7); se tiene:

TABLA. I.
Datos de la curva de peligrosidad sísmica.

	Aceleración (g)
PGA	0.623g
0.5s	0.800g
1s	0.380g
0.2s	1.60g
0.1s	1.60g

TABLA. II.
Parámetros utilizados para calcular el valor del coeficiente de cortante basal.

Parámetro	Sufijo	Valor
Factor de importancia	I=	1.00
PGA-Z	PGA - Z=	0.62
Aceleración espectral de 0,2s	Sa (0,2 seg) =	1.60
Coef. amplificación del suelo en la zona de periodo corto	Fa=	1.12
Coef. amplificación de las ordenadas del espectro elástico	Fd=	1.11
Comportamiento no lineal de los suelos	Fs=	1.40
Factor usado en el espectro de diseño elástico	r=	1.00
Relación de amplificación espectral Sa(0.1seg) /PGA	η=	2.57
Altura de la edificación en metros	hn=	23.42
Coeficiente que depende del tipo de edificio	Ct=	0.06
	α=	0.75
Periodo de Vibración	Ta CODIGO=	0.59
Periodo Límite de Vibración	To=	0.14
Periodo de vibración	Ta=	0.59
Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño	Tc=	0.76
Coeficiente relacionado con el período de vibración de la estructura T	k=	1.04
Aceleración Espectral	Sa (Ta)=	1.79
Coeficiente de reducción de Respuesta Estructural	R=	1.00
Irregularidad en planta	ΦP=	0.90
Irregularidad en elevación	ΦE=	0.90
Coeficiente cortante basal	V=	2.21

- El valor de la cortante basal calculado se incorporó en el modelo estructural y fue aplicado como carga sísmica lateral distribuida en los diafragmas asignados en cada nivel de la edificación (ver anexo, fig.8).
- Así mismo el espectro de demanda se incorporó en el programa para posterior análisis.

2.8.2. Carga Gravitacional No Lineal

El análisis Pushover empieza a partir de las cargas gravitacionales no lineales, por tanto, se define un caso de carga no lineal con la combinación descrita en FEMA 356 [5].

Ec. 3

Cargas gravitacionales no lineales [14]

$$CGNL = 1.1(1.1D + 0.25L) \tag{3}$$

Donde:
CGNL: Cargas gravitacionales
D: Carga muerta
L: Carga viva

2.8.3. Carga No Lineal Estática – Push Over

Una vez asignada la carga gravitacional, se procedió a configurar los casos de carga "Push Over", los cuales se aplicaron de manera lateral en las direcciones de los ejes "X" y "Y".

2.8.4. Rótulas Plásticas

Como parte del proceso de modelación, se aplicó la metodología estandarizada que establece la norma ASCE 41-17 para la definición y asignación de rótulas plásticas en los elementos estructurales. Este procedimiento permitió evaluar con mayor precisión la capacidad de deformación inelástica de la estructura. En la Fig. 9 del anexo, se presentan los límites de deformación permitidos según los criterios de aceptación de la norma, los cuales resultaron fundamentales para el análisis del desempeño estructural de la edificación y su posible rehabilitación sísmica. Dichos criterios aseguraron que la estructura cumpliera con los estados de desempeño exigidos, garantizando su seguridad y funcionalidad frente a cargas sísmicas [5].

Las rótulas plásticas en vigas, columnas y muros fueron asignadas de manera automática, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASCE 41-17. Este proceso garantiza una distribución adecuada de la capacidad de deformación inelástica en los elementos estructurales, permitiendo una evaluación del desempeño sísmico de la edificación conforme a los criterios de aceptación definidos por la norma.

2.8.4.1. Rótulas Plásticas en diagonales equivalentes

La norma ASCE 41-13 presenta la Fig. 10 (ver anexo), la cual define la relación entre la capacidad a cortante

de la columna y la resistencia esperada del relleno de mampostería [15]. Esta relación es aplicable en análisis no lineales de estructuras, permitiendo evaluar el comportamiento inelástico de los elementos estructurales al considerar la interacción entre la mampostería y la columna. Además, proporciona criterios para la modelación y el diseño sísmico de edificaciones existentes [16].

Ec. 4

Relación fuerza-deflexión

$$\beta = \frac{V_{fre}}{V_{ine}} \tag{4}$$

Donde:
V_{fre} : capacidad a cortante de la columna
V_{ine} : resistencia a cortante esperada del relleno

Según la norma ASCE 41-13, la capacidad a cortante de la columna ($Vfre$) representa la resistencia a cortante esperada del marco sin relleno, considerándose equivalente a la capacidad a cortante de la columna [16]. Dado que esta definición se basa en un valor esperado de cortante, se emplea la formulación establecida por la NEC-SE-HM, cuyo cálculo se expresa en la siguiente ecuación [17]:

Ec. 5

Capacidad a corte de la columna

$$V_{fre} = V_n = V_c + V_s \tag{5}$$

Donde:
V_n : resistencia nominal al cortante total
V_c : resistencia nominal al cortante proporcionado por el hormigón.
V_s : resistencia nominal al cortante proporcionado por el refuerzo cortante

La NEC-SE-HM propone las siguientes ecuaciones para el cálculo de Vc y Vs respectivamente:

Ec. 6

Resistencia nominal al cortante proporcionado por el hormigón [18]

$$V_c = 0.17 * \lambda_1 * \sqrt{f'c} * b_w * d \tag{6}$$

Donde:
λ_1 **:** coeficiente que considera las propiedades de interacción entre el relleno y el pórtico
b_w **:** ancho del alma
d **:** distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción
$f'c$ **:** resistencia a compresión del hormigón

Ec. 7

Fórmula de resistencia a la cortante [18]

$$V_s = \frac{A_v * f_{yt} * d}{s} \tag{7}$$

Donde:
V_s **:** resistencia nominal al cortante proporcionado por el refuerzo del cortante
A_v **:** área de refuerzo que resiste cortante
f_{yt} **:** esfuerzo de fluencia del refuerzo transversal
s **:** espaciamiento medido de centro a centro de las unidades tales como refuerzo longitudinal, refuerzo transversal, de pre-esfuerzo, alambres, o anclajes

El ASCE 41-13 propone que la resistencia lateral final esperada de la pared de relleno se calcula de la siguiente manera [16]:

Ec. 8

Resistencia lateral final esperada de la pared de relleno [18]

$$Q_{ce} = V_{ine} = A_{ni} + f_{vie} \tag{8}$$

Donde:
V_{ine}**:** resistencia a cortante esperada del relleno
A_{ni} **:** área de la sección neta con mortero/lechada a través del panel de relleno
f_{vie} **:** resistencia al corte esperado del relleno de mampostería

Por último, para la asignación de la carga de la Resistencia a la compresión esperada del pórtico de mampostería de relleno se va a tomar del artículo escrito por Carrillo y Gonzales, donde investigan la influencia de mampostería no reforzada en el comportamiento inelástico de pórticos de concreto. La fórmula es la siguiente [19]:

Ec. 9

Resistencia a la compresión esperada del pórtico de mampostería de relleno

$$R_{compr} = SF = a * t * f'm \tag{9}$$

Donde:
a **:** ancho equivalente de la mampostería (w)
t **:** espesor del muro (t=0.15 m)
$f'm$ **:** resistencia a la compresión de la mampostería

A continuación, se presenta la Tabla 3, que indica los distintos valores calculados de las 10 diagonales equivalentes que están distribuidas en todo el edificio para determinar las rótulas plásticas en estas. Los criterios de aceptación están obtenidos a partir de la interpolación de la Figura 10.

TABLA. **III.**
Criterios de aceptación y valores para las rótulas plásticas en diagonales equivalentes.

Nombre de rótula	Ancho diagonal	Vn columna- Vfree	Qce-Vine	B	io	Ls	d=cp	Rcomp- Force SF
	m	ton	ton					ton
1	0.1	352.91	3700.16	0.10	0.001	0.0034	0.0044	9.75
2	0.2	346.52	3531.10	0.10	0.001	0.0029	0.0039	19.50
3	0.3	333.69	4265.05	0.08	0.001	0.0027	0.0037	29.25
4	0.4	324.21	6385.07	0.05	0.001	0.0022	0.0032	39.00
5	0.5	266.54	7339.43	0.04	0.001	0.0022	0.0032	48.75
6	0.6	549.91	4844.02	0.11	0.001	0.0022	0.0032	58.50
7	0.7	345.96	4844.02	0.07	0.001	0.0028	0.0038	68.25
8	0.8	335.28	10679.66	0.03	0.001	0.0028	0.0038	78.00
9	0.9	316.70	7339.43	0.04	0.001	0.0022	0.0032	87.75
10	1	332.01	9321.07	0.04	0.001	0.0020	0.0030	97.50

2.8.5. Desempeño estructural

Tras la incorporación de las rótulas plásticas en vigas, columnas y mampostería, se realiza el análisis estático no lineal para obtener las curvas y espectros de capacidad, así como los puntos de desempeño en ambas direcciones. El software asigna colores a los elementos según el nivel de daño estructural alcanzado, lo cual permite identificar zonas críticas y facilitar decisiones sobre refuerzo o intervención.

TABLA IV.
Codificación por colores de los niveles de desempeño estructural según FEMA 356/ASCE 41 y software de modelación estructural

Ocupación Inmediata (OI)	Seguridad de Vida (LS)	Prevención al colapso (PC)	Colapso (C)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. 1. RESULTADOS DE EVALUACIÓN PRE-EVENTO

A partir de los valores obtenidos, se analiza que la edificación se ubica en una zona de sismicidad moderadamente alta, con coeficientes de 1.19 y 0.83. Una vez identificada esta condición, se procedió a seleccionar el formulario correspondiente a dicha categoría. Los resultados obtenidos evidencian la necesidad de realizar una evaluación estructural más detallada.

3. 2. RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

TABLA. V.
Resistencia a la compresión (Planta Baja)

Resistencia a la compresión f'c (kg/cm2)						
Planta baja						
Columnas	Ascendente	Mediana	Vigas	Ascendente	Mediana	Losa
D-4	328.00	**402.00**	y	418.00	**420.00**	**468.00**
A-3	391.00					
B-4	413.00		x	422.00		
E-3	431.00					

Resistencia a la compresión (Piso 1)

Resistencia a la compresión f'c (kg/cm2)						
Piso 1						
Columnas	Ascendente	Mediana	Vigas	Ascendente	Mediana	Losa
B-4	390.00	**393.00**	y	346.00	**430.50**	**501.00**
A-3	391.00					
D4	395.00		x	515.00		
E-3	416.00					

Resistencia a la compresión (Piso 2)

Resistencia a la compresión f'c (kg/cm2)						
Piso 2						
Columnas	Ascendente	Mediana	Vigas	Ascendente	Mediana	Losa
A-3	363.00	**412.00**	y	372.00	**389.00**	**538.00**
E-3	388.00					
B-4	436.00		x	406.00		
D-4	471.00					

Resistencia a la compresión (Piso 3)

Resistencia a la compresión f'c (kg/cm2)						
Piso 3						
Columnas	Ascendente	Mediana	Vigas	Ascendente	Mediana	Losa
B-4	240.00		y	495.00		
A-3	294.00	**300.50**			**498.50**	**505.00**
D-4	307.00		x	502.00		
E-3	399.00					

Resistencia a la compresión (Piso 4)

Resistencia a la compresión f'c (kg/cm2)						
Piso 4						
Columnas	Ascendente	Mediana	Vigas	Ascendente	Mediana	Losa
C-3	220.00					
B-3	260.00		y	268.00		
F-3	260.00	**275.00**			**268.00**	**268.00**
E-2	290.00					
D-4	318.00		x	268.00		
F-2	340.00					

Se presentan los resultados de las resistencias a la compresión obtenidas mediante ensayos de esclerometría en columnas, vigas y losas, se evidencia que la mediana de la resistencia a la compresión en las columnas es de: 402.00 , 393.20 , 412.00 , 300.50 y 275.00 , correspondientes a la planta baja, primer piso, segundo piso, tercer piso y cuarto piso, respectivamente. Al comparar estos valores con la mediana de las resistencias a la compresión obtenidas para las vigas en las direcciones X e Y, se obtuvieron los siguientes resultados: 420.00 kg/cm², 430.50 , 389.00 , 498.50 y 268.00 , correspondientes a la planta baja, primer piso, segundo piso, tercer piso y cuarto piso, respectivamente. En general, se observa que la resistencia a la compresión de las vigas es superior en la mayoría de los niveles de la edificación en comparación con las columnas. No obstante, se detecta una reducción significativa en las resistencias en los niveles superiores, especialmente en el cuarto piso, donde la resistencia de las columnas es menor que la de las vigas, lo que podría indicar variaciones en la calidad del concreto, diferencias en las condiciones de carga o aspectos relacionados con la ejecución de la obra.

3. 3. RESULTADOS DE EMPUJE SOBRE EL MURO DE CONTENCIÓN

Los resultados obtenidos para las presiones del suelo aplicadas sobre el muro de contención de la estructura analizada fueron los siguientes: 5.38 t/m² como empuje del suelo, 3.29 t/m² por cohesión, y 2.21 t/m², 3.52 t/m², 4.38 t/m² y 3.72 t/m² como empujes de sobrecarga distribuidos en los muros M1, M2, M3 y M4, respectivamente como lo indica la Fig. 13 (ver anexo). Estos valores permitieron que el modelado estructural se ajustara de manera más precisa a la realidad, logrando una representación más fiel del comportamiento de la edificación.

3. 4. RESULTADOS DE ENSAYO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

En la Fig. 14 del anexo, se pueden ver los espectros de frecuencia de las tres componentes del sensor 2375, en color verde y rojo que representan al "ESTE y NORTE impuesto" respectivamente. Todas las gráficas representativas del "ESTE impuesto" tienen dos picos notorios y todas las gráficas que representan el "NORTE impuesto" presentan un solo pico con una base relativamente ancha.

Para cuantificar los periodos de vibración, se necesita encontrar el valor de la frecuencia de cada pico, para lo cual se halló mediante escalas cada uno de los picos mencionados, expuesto en la Tabla 6 del anexo:

Como se indicó anteriormente, los picos en las curvas de PSD (Amplitud) reflejan las frecuencias dominantes de la estructura; invirtiendo el valor de la frecuencia (T = 1/f), se obtienen los periodos de vibración correspondientes. El periodo más alto representa el primer modo de vibración, es decir el periodo fundamental de la estructura, como se indica en la Tabla 8 del anexo:

A partir de la curva PSD obtenida en el ensayo de vibración ambiental, se identificaron los picos de amplitud que reflejan las frecuencias dominantes del sistema estructural. Al invertir dichos valores (T = 1/f), se determinaron los periodos de vibración correspondientes.

El análisis modal evidenció que el primer modo de vibración de la estructura tiene una frecuencia dominante de 2.898 Hz, lo que corresponde a un periodo fundamental de 0.345 segundos, representando la respuesta dinámica principal frente a solicitaciones sísmicas. Los modos siguientes registraron frecuencias de 3.129 Hz y 3.814 Hz, equivalentes a periodos de 0.320 s y 0.262 s, respectivamente. Esta progresión refleja un patrón típico en estructuras, donde los periodos disminuyen conforme se consideran modos superiores, indicando variaciones en la rigidez y en la distribución de masas del sistema.

El periodo fundamental identificado es un parámetro clave para comparar con el modelo numérico y verificar si la rigidez estructural modelada coincide con el comportamiento dinámico observado. Una diferencia significativa entre estos resultados y los obtenidos por modelación indicaría la necesidad de ajustar parámetros estructurales para lograr mayor realismo en el análisis.

3. 5. RESULTADOS DE PERIODO DE VIBRACIÓN. SOFTWARE

Se presentará una comparación de los resultados del periodo de vibración en segundos obtenidos en el software

de modelación estructural versus los del ensayo de vibración ambiental (ver anexo, tabla 9).

A partir de los resultados obtenidos, se evidenció una discrepancia considerable entre el período fundamental determinado mediante el ensayo de vibración ambiental (0.345 s) y el obtenido a través del software de modelación estructural (0.549 s). Esta diferencia pone de manifiesto la necesidad de rigidizar la estructura, con el fin de que el modelo se ajuste de manera más precisa al comportamiento real observado.

3. 6. RESULTADO DE AJUSTE DE MODELO MATEMÁTICO

3. 6.1. Resultado de diagonales de mampostería

Para representar la mampostería dentro del modelo estructural, se empleará el método de "diagonales equivalentes" descrito en la FEMA 356 [20]. Adicionalmente, se aplicó variación propuesta por Öztürkoğlu [21], que introduce un factor K para reducir la rigidez en los muros que tienen aberturas como ventanas o puertas, afectando el ancho efectivo de la diagonal y, por ende, su contribución en el comportamiento global del pórtico [22].

Se propuso que los anchos de las diagonales se redondeen al inmediato superior o inferior, de esta manera se van a presentar 10 diagonales representativas que van desde el ancho w=0.1 m hasta el w=1.00 m, las cuales van a estar distribuidas en todo el edificio, como se puede apreciar en la Fig. 17 del anexo:

Con el propósito de igualar el periodo fundamental del modelo con el obtenido en el Ensayo de Vibración Ambiental, se desarrolló un proceso iterativo en el que se ajustaron las propiedades de la diagonal equivalente (resistencia a la compresión f′m y módulo de elasticidad E′m). Dichas modificaciones se reflejaron tanto en el software de modelado como en la hoja de cálculo correspondiente, donde se recalculó el ancho efectivo de la diagonal según las nuevas propiedades asignadas. Tras este procedimiento, se consiguió reproducir el periodo de vibración medido en el ensayo, tal como se ilustra en la Fig. 18 y 19 del anexo:

El uso de diagonales equivalentes con la resistencia de 72 , permitió reducir la discrepancia entre los periodos de vibración calculados y medidos experimentalmente, logrando una correlación muy cercana, especialmente en el primer modo de vibración. Con esta estrategia se pudo incrementar la rigidez global de la estructura, reflejando un comportamiento más acorde a la realidad. Después de la implementación de estos ajustes, en el cual se logró resultados de 0.346 s y 0.345 s para periodos fundamentales del software de modelación y ensayo de vibración ambiental respectivamente (ver anexo, tabla 10).

Para comprobar que los periodos de vibración se encuentren dentro de un rango aceptable, se procede a evaluarlos considerando el criterio utilizado por Juan Pacheco en su tesis, donde realiza una comparación cuantitativa entre los modos propios (frecuencia y periodo) obtenidos en los ensayos y en el modelo numérico. En dicho análisis se discuten los porcentajes de error recomendados, que generalmente se ubican entre el 5 % y el 15 % [23].

Ec. 10

Evaluación de porcentaje de error del periodo fundamental

$$\boldsymbol{Error}(\%) = \left|\frac{\boldsymbol{Valor\ ensayado - Valor\ calculado}}{\boldsymbol{Valor\ ensayado}}\right| \times \mathbf{100}\% \qquad (10)$$

Donde:

$$\boldsymbol{Error}(\%)_{\boldsymbol{1modo}} = \left|\frac{\mathbf{0.345 - 0.346}}{\mathbf{0.345}}\right| \times \mathbf{100}\%$$

$$\boldsymbol{Error}(\%)_{\boldsymbol{periodo\ fundamental}} = \mathbf{0.290}\%$$

El valor de resistencia a la compresión f'm que se ajustó para poder llegar a tener menos de 1% de porcentaje de error es de f'm= 72 , rango en el que Nguyen Molina considera aceptable para bloques de concreto con similares propiedades como dimensiones y fabricación del bloque considerado en el estudio [24].

Dado que el error en el periodo fundamental es inferior al 1 % y que los modos de vibración restantes presentan errores dentro de un rango aceptable, se puede analizar que existe una excelente correlación entre el modelo y el ensayo. Por consiguiente, se considera satisfactorio el ajuste del modelo matemático.

Adicional, de acuerdo con la Figura 19 de participación modal de masas obtenida tras la calibración, se evidencia que el primer modo de vibración, con un periodo de 0.346 s, presenta una alta participación modal en UY (0.66), lo que confirma que la respuesta estructural en la dirección "Este" es dominante. Esta observación es consistente con los datos obtenidos en el ensayo de vibración ambiental, donde se registraron picos significativos en la dirección verde (Este), validando así la precisión del modelo ajustado.

3.6.2. Rótulas plásticas en diagonales equivalentes

Uno de los parámetros clave en la modelación no lineal fue el valor Rcomp Force SF, que representa la resistencia máxima a compresión en la rótula. Este valor se ingresó directamente en el campo Force SF del software de análisis (Figura11). Por ejemplo, para una rótula correspondiente a un ancho de 0.20 m, se utilizó un valor de 19.5 tonf, el cual coincide con el mostrado en la interfaz de configuración. Dicho valor, junto con el desplazamiento de cedencia Disp SF = 0.001 m, definió el inicio del comportamiento inelástico (punto B).

Posteriormente, se definieron los parámetros de aceptación para los estados de desempeño IO (Immediate Occupancy), LS (Life Safety) y CP (Collapse Prevention), determinados mediante interpolación de la Figura 10 de "Relación fuerza–deflexión simplificada de paneles rellenos

de mampostería para procedimientos no lineales" del documento FEMA356 [20]. Los desplazamientos correspondientes a cada estado (0.001, 0.0029 y 0.0039 m, respectivamente) marcaron los límites de desempeño aceptables.

Al analizar los resultados, se observó una progresión coherente en los valores de resistencia conforme aumentaba el ancho de la diagonal, alcanzando hasta 97.5 tonf en el caso de 1.0 m. Este comportamiento evidencia la correcta asignación de rigideces y capacidades en función de la geometría del sistema.

La implementación de estos valores en el modelo permitió representar el comportamiento no lineal de los elementos de refuerzo, aspecto fundamental para evaluar con precisión el desempeño estructural bajo acciones sísmicas.

3.7. RESULTADOS DE PUNTO DE DESEMPEÑO

Durante el análisis estático no lineal de la estructura (ver anexo, fig. 20 y fig. 21), se evaluaron distintos métodos normativos para determinar el punto de desempeño, incluyendo los propuestos por la FEMA 440 y ASCE 41-13. Sin embargo, debido a la complejidad geométrica y al comportamiento inelástico de la edificación, el método del ASCE 41-13 (NSP) no lograron converger en la estimación del desplazamiento objetivo, mostrando errores en el proceso iterativo de cálculo.

Frente a esta limitación técnica, se empleó exclusivamente el método del espectro de capacidad bajo la guía FEMA 440, que permitió obtener la curva de capacidad y definir satisfactoriamente el punto de desempeño estructural. Esta metodología, además de estar respaldada por la normativa, ofreció estabilidad numérica y compatibilidad con el modelo estructural planteado.

Por tanto, el uso exclusivo de este método se justifica tanto por criterios normativos como por la confiabilidad de los resultados obtenidos en el proceso de evaluación sísmica [25].

3.8. CURVAS DE CAPACIDAD (VER ANEXO, FIG. 22 Y FIG. 23)

3.9. PUNTOS DE DESEMPEÑO

3.9.1. Puntos de desempeño eje X (ver anexo, fig. 24)

En la tabla 11 del anexo, se presenta el resumen de resultados en donde se encontró el punto de desempeño para la dirección X.

3.9.2. Resultados de punto de desempeño eje X (ver anexo, tabla 12 y Fig. 25)

3.9.3. Puntos de desempeño eje Y (ver anexo, fig. 26)

En la tabla 13 del anexo, se presenta el resumen de resultados en donde se encontró el punto de desempeño para la dirección Y

3.9.4. Resultados de punto de desempeño eje Y (ver anexo, tabla 14).

El análisis de desempeño estructural evidencia que los elementos estructurales principales, como muros, columnas y vigas, no presentan rótulas plásticas en niveles de Seguridad de Vida (LS), Prevención al Colapso (CP) o Colapso (C) (fig. 25 y 27), lo que indica que la estructura mantiene un comportamiento estable ante las cargas aplicadas. En la dirección X, el análisis muestra que el desplazamiento máximo en el punto de desempeño es de 0.107 m, mientras que en la dirección Y alcanza 0.079 m, lo que sugiere que la rigidez es mayor en la dirección más corta (Y). Asimismo, la capacidad de carga en la dirección X es de 3601.84 toneladas, mientras que en la dirección Y es de 2864.44 toneladas, lo que indica que la estructura en la dirección más larga está diseñada para soportar mayores esfuerzos sin comprometer su desempeño. La aceleración espectral también refleja esta diferencia de rigidez, con Sa = 3.02 m/s² en X y Sa = 2.36 m/s² en Y, (Tablas 11 a 14). Además, las rótulas plásticas formadas en los elementos estructurales se mantienen dentro del nivel de Ocupación Inmediata (IO) (fig. 25 y 27), sin alcanzar niveles críticos que indiquen la necesidad de intervenciones adicionales, lo que demuestra que la estructura conserva su estabilidad y capacidad resistente ante las solicitaciones analizadas.

4. CONCLUSIONES

Los ensayos de esclerometría revelaron una disminución progresiva en la resistencia del hormigón con la altura, atribuible a factores constructivos como la dosificación, compactación y curado. Pese a estas variaciones, el comportamiento estructural no se vio comprometido, ya que el sistema aporticado de la edificación distribuye adecuadamente los esfuerzos.

Se consideró el empuje de suelos sobre el muro de contención, evidenciando su influencia en la redistribución de esfuerzos y resaltando la importancia de incluirlo en el análisis, a pesar de no formar parte del sistema estructural.

La incorporación de diagonales equivalentes representando la mampostería permitió ajustar la rigidez del modelo, logrando concordancia entre el periodo de vibración obtenido experimentalmente y el calculado. Esto se vio reforzado con los resultados del ensayo de vibración ambiental, que validaron el comportamiento dinámico y la precisión del modelo estructural.

El análisis de desempeño estructural reveló que el desplazamiento en el punto de desempeño fue mayor en la dirección larga que en la corta, lo que sugiere una menor rigidez global en la dirección larga. No obstante, la aceleración espectral fue mayor en la dirección corta, estableciendo una aparente discrepancia con el desplazamiento. Esta situación se explica por la distribución no uniforme de rigideces en altura: la presencia de un muro de contención de hormigón armado, ubicado exclusivamente en la planta baja y paralelo a la dirección corta, indujo una rigidez local dominante en la misma. Esta rigidez concentrada resultó en el menor desplazamiento en el punto de desempeño en la dirección corta, pero

también influyó en la respuesta dinámica, resultando en un valor de aceleración espectral significativamente mayor en esa misma dirección. En conclusión, la respuesta del sistema estructural está controlada por este elemento rígido en la base, lo que genera una alta concentración de fuerzas de corte en la planta baja que fue considerada y evaluada en la determinación de la capacidad final.

Finalmente, se determinó que la edificación, de ocupación especial y evaluada para un sismo de periodo de retorno de 2500 años, no presenta daños estructurales significativos. Las rótulas plásticas se limitaron a la mampostería y las rótulas de vigas y columnas se mantuvieron en el nivel de desempeño de Ocupación Inmediata. Por tanto, no se requiere reforzamiento, y la estructura puede continuar en uso de forma segura.

El análisis estructural evidenció que, aunque la edificación en general alcanzó el estado de desempeño correspondiente a Ocupación Inmediata, no todas las paredes de mampostería compartieron dicho comportamiento, presentando niveles de respuesta inferiores. Esta diferencia pone de manifiesto la relevancia de incluir la mampostería en los modelos estructurales, ya que su presencia afecta significativamente la rigidez global y la capacidad del sistema para disipar energía. En consecuencia, su incorporación en los análisis numéricos es fundamental para lograr una evaluación precisa y realista del desempeño sísmico de estructuras aporticadas.

REFERENCIAS

[1] A. M. Moscoso Vásquez y J. S. Díaz Méndez, «Determinación de la taxonomía, vulnerabilidad estructural y su aplicación,» Universidad del Azuay, Cuenca, 2024.

[2] A. Sarria Molina, Capítulo 4: Tectónica global y origen de los sismos, Santiago: Universidad de los Andes, 2003.

[3] P. Quinde Martínez y E. Reinoso Angulo, «Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la ciudad de Cuenca,» *Revista de Ingeniería Sísmica* No.94, Quito, pp.1-20, 2016.

[4] U. C. d. Ecuador, Facultad de Ingeniería Química, Quito, 2016.

[5] FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, FEMA 356: Prestandard for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington, D.C: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 2000.

[6] Consejo técnico de uso y gestión del suelo, «Parámetros evaluación edificaciones existentes de alta ocurrencia,» Miduvi, Quito, 2020.

[7] Consejo Técnico de Uso y Gestión del Suelo, Parámetros evaluación edificaciones existentes de alta concurrencia, Quito: Resolución Nro.008-CTUGS-2020, 2020.

[8] M. Wathelet, J.-L. Chatelain, C. Cornou, G. Di Giulio, B. Guillier, M. Ohrnberger y A. Savvaidis, «Geopsy: A User-Friendly OpenSource Tool Set for Ambient,» *Electronic Seismologist*, 2020.

[9] M. D. Braja, Fundamentos de ingeniería geotécnica, California: California State, Sacramento, 1999.

[10] Grypo Taylor y Francis, Craig's Soil Mechanics, 7ª edición, 2004.

[11] C. Donald, Foundation Design: Principles and Practices. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2011.

[12] A. Marinilli, "Comparación de modelos numéricos para el análisis sísmico de edificaciones de mampostería confinada", presentado en Jornadas de investigación IDEC, Venezuela, 2018.

[13] Norma Ecuatoriana de la Construcción, PELIGRO SÍSMICO DISEÑO SISMORESISTENTE, Quito: Ministro de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015.

[14] Federal emergency managment agency, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (FEMA 440), Washington D.C: U.S. Department of Homeland Security, 2005.

[15] C. A. Capa Ramón y F. G. Guallpa Minchala, «Análisis estático lineal y no lineal de un edificio de hormigón armado,,» Universidad del Azuay, Cuenca, 2021.

[16] ASCE/SEI 41-13, Seismic Evaluation and Retrofi t of Existing Buildings, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2013.

[17] NEC-SE-HM, ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO, Quito: Cámara de la Industria de la Construcción, 2015.

[18] A. C. Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19), Farmington Hills: ACI, 2019.

[19] J. Carrillo y G. González, Influencia de la mampostería no reforzada en el comportamiento inelástico de pórticos de concreto, vol. 74, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2007, pp. 217-227.

[20] F. E. M. A. (FEMA), restandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356), Washington D.C: Federal Emergency Management Agency, 2000.

[21] O. Ozturkoglu, T. Ucar y Y. Yusuf, Effect of masonry infill walls with openings on nonlinear response of reinforced concrete frames, Esmirna: Earthquake and Structures, 2017.

[22] P. Asteris, C. Crysostomou, L. Giannopoulos y E. Smyrou, Masonry infilled reinforced concrete frames with openings, III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2011.

[23] J. Pacheco Muñoz, Calibración estructural basada en vibraciones ambientales y determinación de rangos de error aceptables, Bogotá: Universidad de los Andes, 2022.

[24] N. Molina Narváez, Análisis de la resistencia a la compresión de bloques de concreto usados en la construcción de viviendas en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Chiapas, 2022.

[25] Federal Emergency Mangment Agency (Fema), Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (FEMA 440), Washington D.C: FEMA, 2005.

ANEXOS

Fig. 6.

Vista en planta en la cual se indican-muestran los puntos de control en el muro de contención

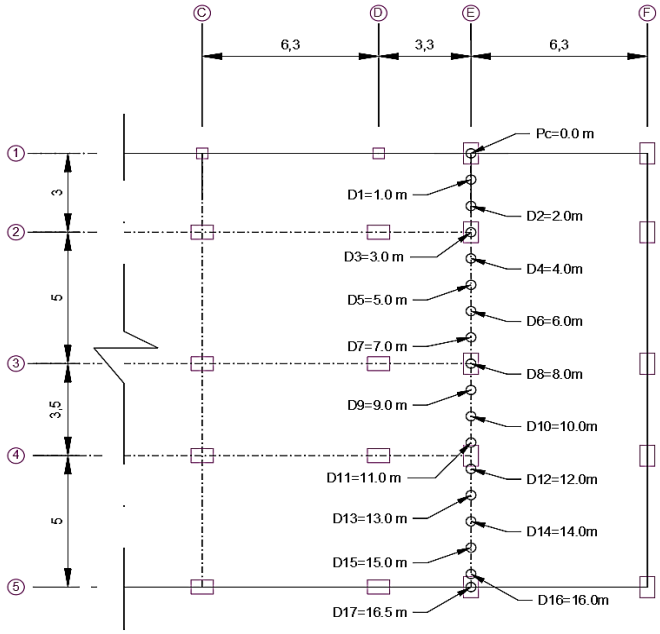
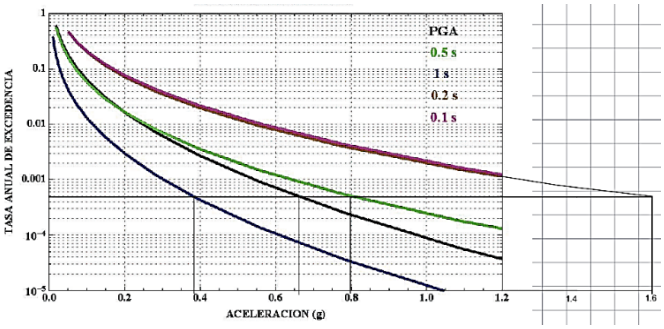


Fig. 7

Curva de peligro sísmico para Quito – Obtención de valor de PGA-Z y Sa 0.1s



Nota. NEC-SE-DS [13].

Fig. 8

Espectro Curvas de Peligro sísmico NEC-2015-Tr=2500 años

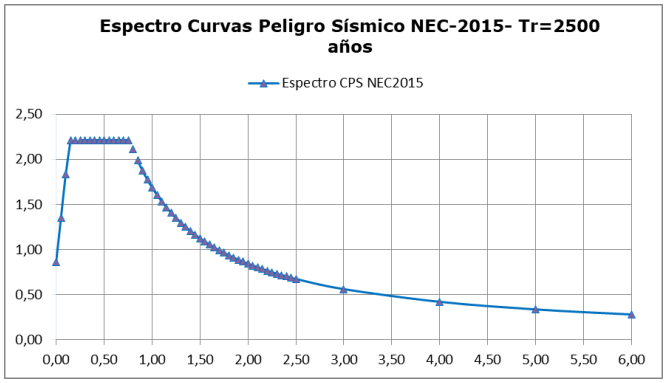
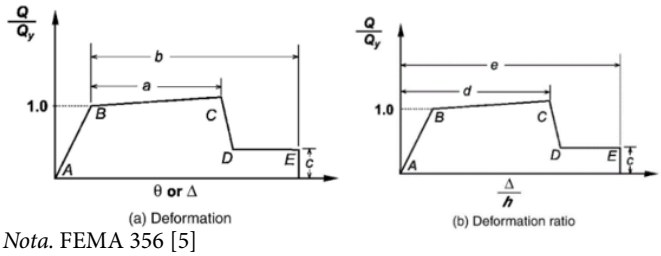


Fig. 9

Limites de deformación permitidos en función de los criterios (Fema 356)



Nota. FEMA 356 [5]

Fig. 10

Relación fuerza-deflexión simplificado de paneles rellenas de mampostería para procedimientos no lineales.

$\beta = \frac{V_{fre}}{V_{ine}}$	$\frac{L_{inf}}{h_{inf}}$	Razón de resistencia residual c	d (%)	e^b (%)	Criterio de aceptación LS (%)	CP (%)
$\beta < 0.7$	0.5	NA	0.5	NA	0.4	NA
	1.0	NA	0.4	NA	0.3	NA
	2.0	NA	0.3	NA	0.2	NA
$0.7 \leq \beta \leq 1.3$	0.5	NA	1.0	NA	0.8	NA
	1.0	NA	0.8	NA	0.6	NA
	2.0	NA	0.6	NA	0.4	NA
$\beta \geq 1.3$	0.5	NA	1.5	NA	1.1	NA
	1.0	NA	1.2	NA	0.9	NA
	2.0	NA	1.9	NA	0.7	NA

Nota. ASCE 41-13 [16].

Fig. 11

Rótula plástica de diagonal equivalente w= 0,2 m.

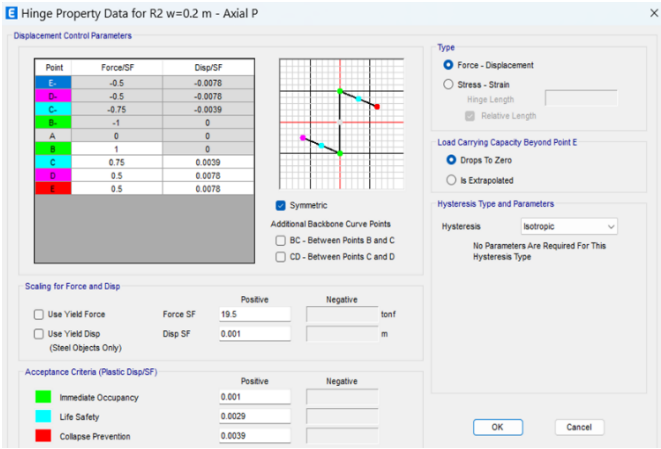


Fig. 12

Modelado de la estructura, incluyendo diagonales equivalentes de mampostería.

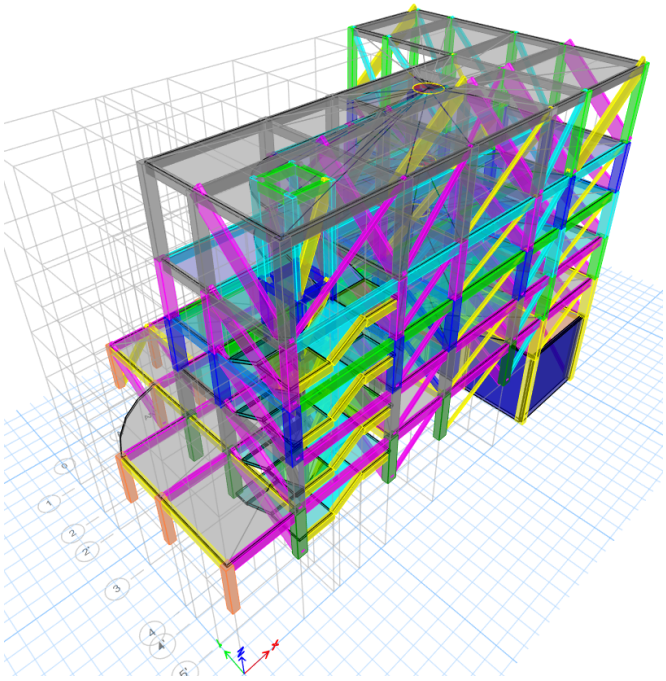


Fig. 13

Distribución de presiones sobre los muros.

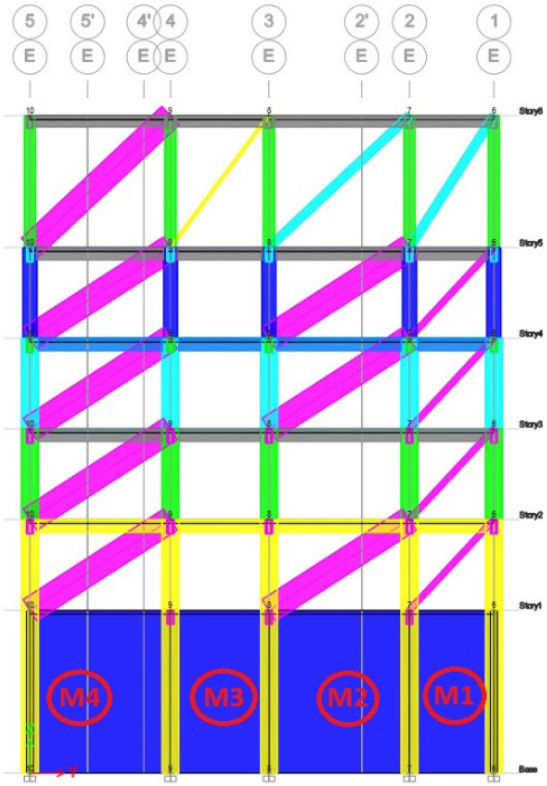
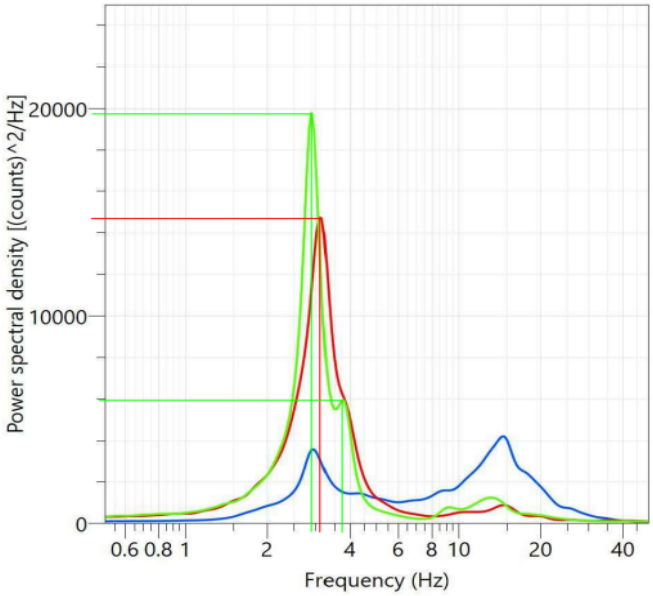


Fig. 14

Espectro de Frecuencia (Sismógrafo 2375).



Nota. Ing. Juan Gabriel Barros (2025)

Fig. 15

Periodo Fundamental de la estructura (Period: 0.54) - Software de Modelación.

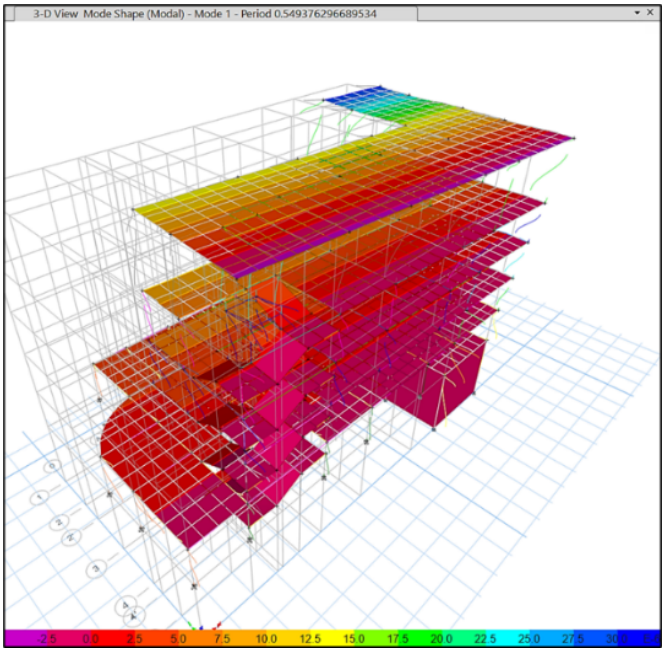


Fig. 16

Periodos de vibración con su participación modal - Software de Modelación.

TABLE: Modal Participating Mass Ratios							
Mode	Period sec	UX	UY	RZ	SumUX	SumUY	SumRZ
1	0.549	0.0338	0.5151	0.0961	0.0338	0.5151	0.0961
2	0.475	0.576	0.0617	0.0052	0.6098	0.5768	0.1013
3	0.387	0.0387	0.0865	0.4813	0.6486	0.6633	0.5827

Fig. 17

Diagonales equivalentes en el modelo matemático.

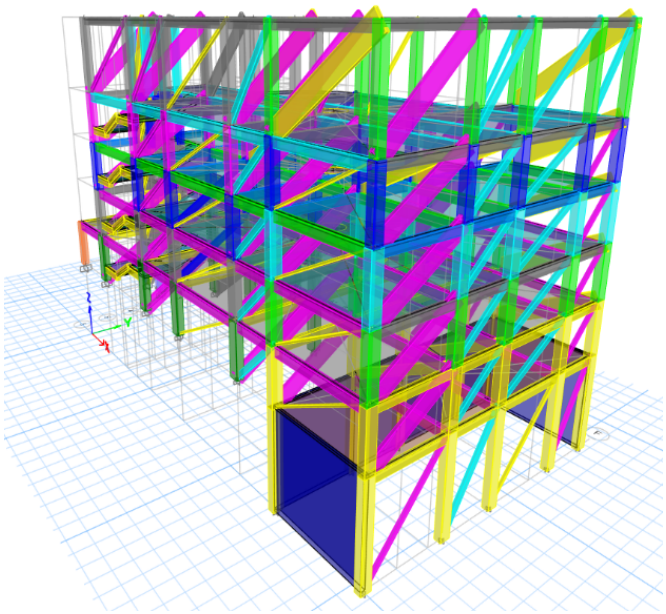


Fig. 18

Periodo Fundamental de la

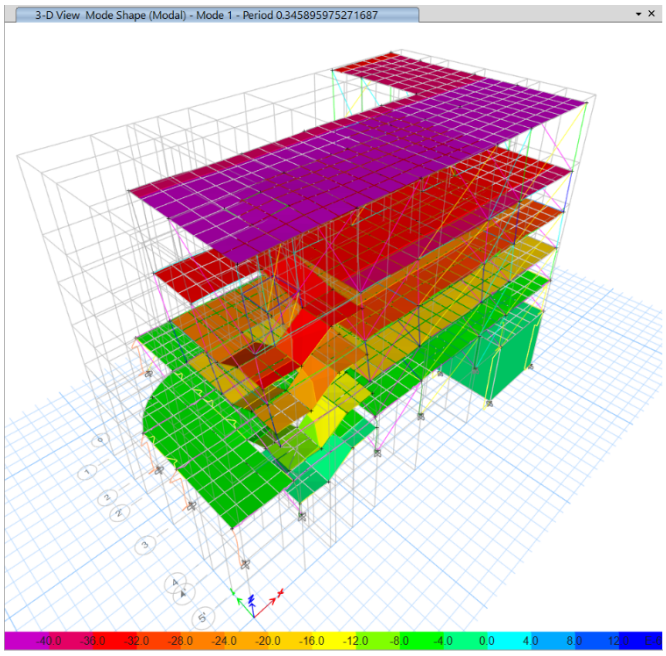


Fig. 19

Periodos de vibración con su participación modal - Software de Modelación.

TABLE: Modal Participating Mass Ratios							
Mode	Period sec	UX	UY	RZ	SumUX	SumUY	SumRZ
1	0.346	0.0032	0.6696	0.0181	0.0032	0.6696	0.0181
2	0.338	0.6593	0.0063	0.02	0.6625	0.6759	0.0381
3	0.279	0.0228	0.0093	0.596	0.6852	0.6852	0.6341

Fig. 20.

Punto de desempaño mediante método ASCE 41.

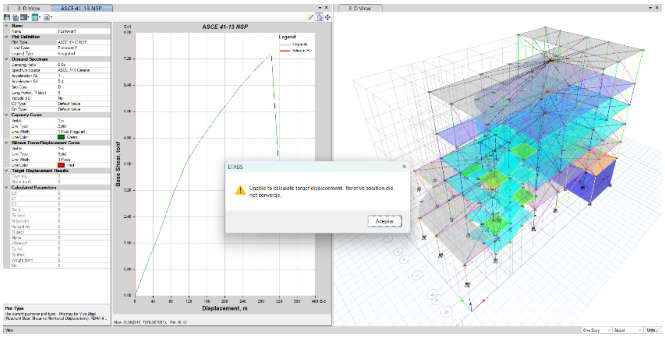


Fig. 21.

Punto de desempeño mediante método FEMA 440.

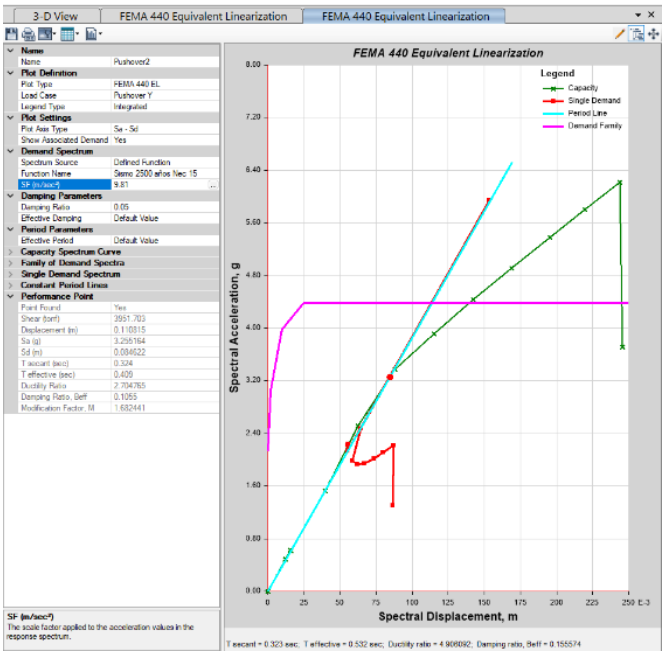


Fig. 22

Curva de capacidad EJE X.

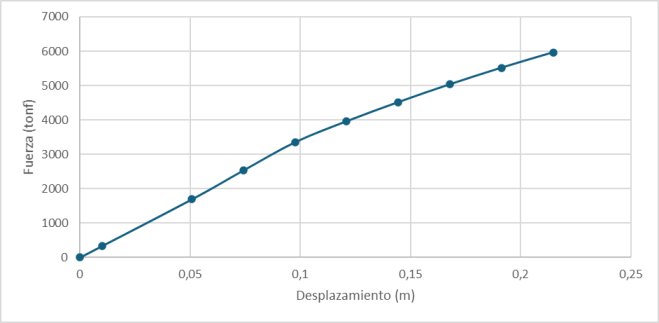


Fig. 23

Curva de capacidad EJE Y.

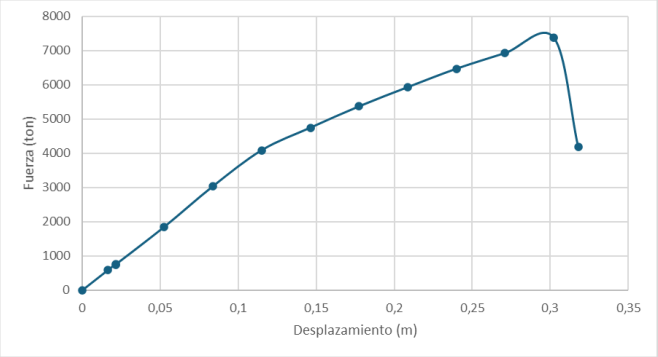


Fig. 24

Espectro de Capacidad-Punto de desempeño EJE X.

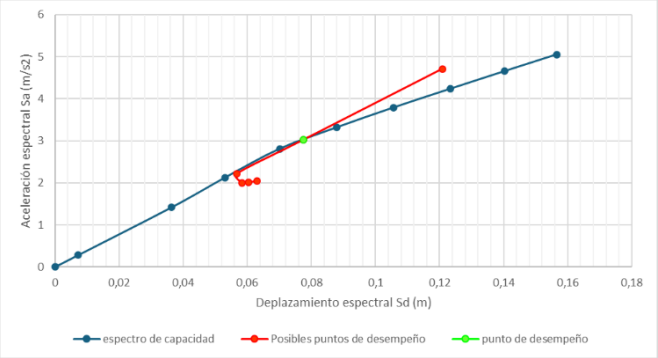


Fig. 25

Rótulas plásticas EJE 3-Step 5.

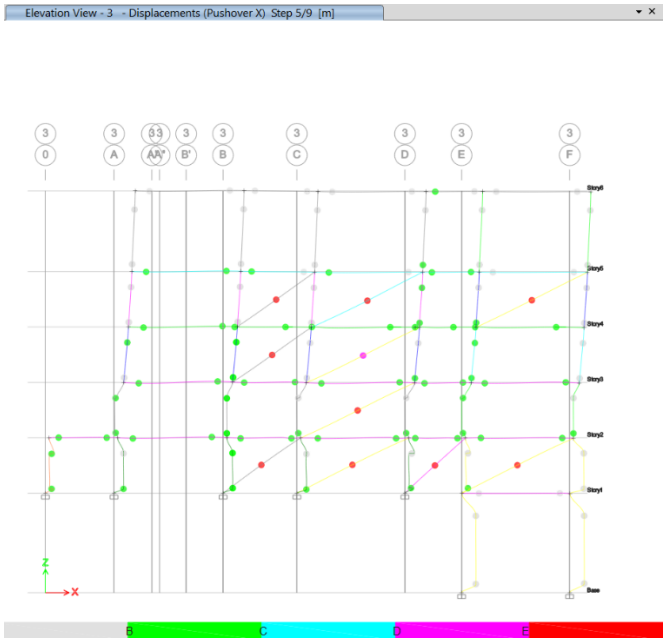


Fig. 26

Curva de capacidad EJE Y.

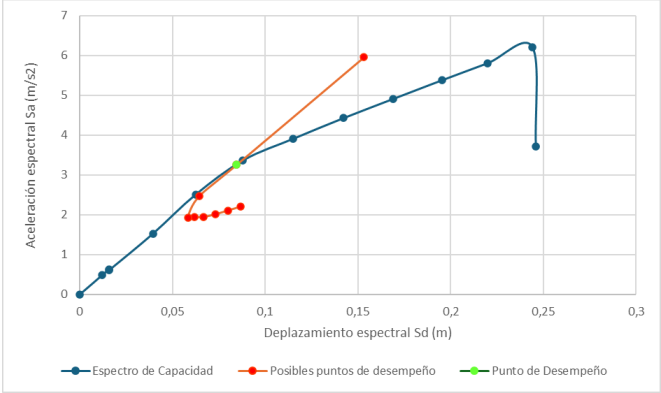


Fig. 27

Rótulas plásticas EJE F - Step 5.

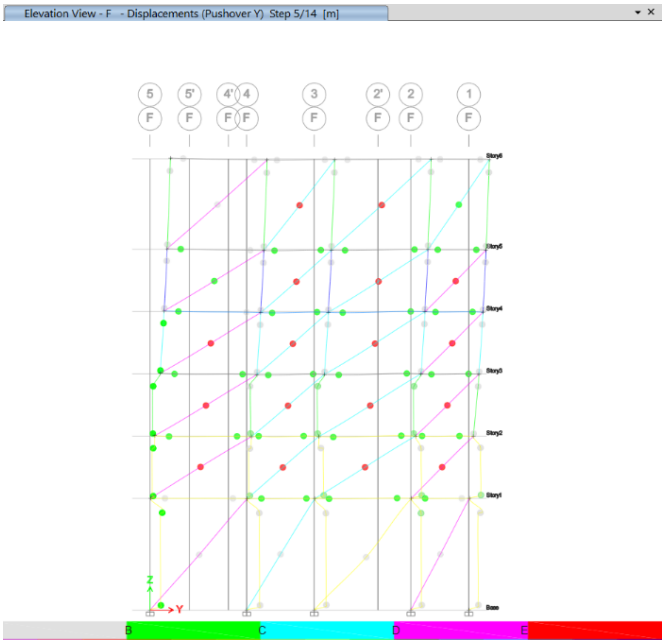


TABLA. VI

Escalas de interpolación de la frecuencia en la gráfica PSD

Escalas-Interpolación	
Primer Modo	
0.294	0.234
0.500	2.898
Segundo Modo	
0.026	0.007
0.500	3.129
Tercer Modo	
0.022	0.014
0.500	3.814

TABLA. VII
Resumen de los valores encontrados según el Número de sismógrafo cada pico de Frecuencia y PSD (Amplitud) para determinar el periodo de vibración.

Sismógrafo Nro	ESTE-Gráfica color verde			
	Frecuencia	Amplitud	Frecuencia	Amplitud
2656	2.898	19	3.814	11.0
2608		19.5		11.0
2597		31		16.0
2468		24		
2375		20	3.814	6.0
Sismógrafo Nro	**ESTE-Gráfica color verde**			
	Frecuencia	**Amplitud**	**Frecuencia**	**Amplitud**
2656	3.129	18		
2608		19.6	3.814	11.2
2597		18		
2468		17		
2375		14.5		

TABLA. VIII
Resultados de modo de vibración.

Modo vibración	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
1	2.898	0.345
2	3.129	0.320
3	3.814	0.262

TABLA. IX
Resultados de modo de vibración.

Modo vibración	Periodo vibración (sec)		
	Software	vs	Ensayo
1	0.549	≠	0.345
2	0.475	≠	0.32
3	0.387	≠	0.262

TABLA. X
Modos de vibración corregido.

Modo vibración	Periodo vibración (sec)		Error (%)
	Software	Ensayo	
1	0.346	0.345	0.29
2	0.338	0.320	5.63
3	0.279	0.262	6.49

TABLA. XI
Punto de desempeño EJE X.

Punto de desempeño dirección x			
Espectro de Capacidad		Curva de Capacidad	
Sa (m/s2)	desplazamiento (m)	Fuerza (ton)	desplazamiento (m)
3.0224555	0.077503	3601.8406	0.107329

TABLA. XII
Ubicación del Punto de desempeño EJE X.

Step	Desplazamiento (m)	Fuerza (ton)	IO	LS	PC	C
0	0	0	0	0	0	0
1	0.010008	333.1368	1	0	0	0
2	0.050782	1689.6446	216	0	0	5
3	0.074202	2530.3512	298	20	5	20
4	0.097622	3348.2463	366	2	5	40
5	0.121042	3960.0931	422	2	4	48
6	0.144462	4514.4664	477	3	0	50
7	0.167882	5033.0028	517	5	0	51
8	0.191302	5514.8156	541	2	0	54
9	0.214722	5958.8271	575	1	0	56

TABLA. XIII
Punto de desempeño EJE Y.

Punto de desempeño dirección y			
Espectro de Capacidad		Curva de Capacidad	
Sa (m/s2)	Sd (m)	Fuerza (ton)	desplazamiento (m)
2.363768	0.059031	2864.4428	0.07912

TABLA. XIV
Ubicación del Punto de desempeño EJE Y.

Step	Desplazamiento (m)	Fuerza (ton)	IO	LS	PC	C
0	0	0	0	0	0	0
1	0.016409	588.7576	12	0	0	0
2	0.021285	762.2021	38	0	0	0
3	0.021294	749.8593	36	0	0	3
4	0.052521	1852.094	264	0	0	3
5	0.083747	3040.5626	355	0	1	42
6	0.114974	4091.1807	448	7	1	42
7	0.146201	4749.8831	516	9	1	53
8	0.177427	5372.9238	560	4	1	66
9	0.208654	5934.1586	609	5	0	73
10	0.212557	3618.5875	655	1	0	83
11	0.220364	3730.8789	663	1	0	83
12	0.235977	3234.6167	721	1	0	84
13	0.251591	3415.0673	721	0	0	92
14	0.282817	3186.3159	733	2	0	96

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

INGENIO
2026, VOL 9(1), ENERO - JUNIO, PP. 089-096

REVISTA INGENIO

Assessment of Bim-Facility Management for the Potentialization of Sports Infrastructure. Case Study.

Valoración de Bim-Facility Management para la Potencialización de Infraestructura Deportiva. Caso de Estudio.

Alex Maldonado-García | Universidad Central del Ecuador-UCE, Quito (Ecuador)
Mohammadfarid Alvansazyazdi | Universidad Central del Ecuador-UCE, Quito (Ecuador)

Recibido: 20/10/2025
Recibido tras revisión: 31/10/2025
Aceptado: 5/11/2025
Publicado: 28/1/2026

PALABRAS CLAVE
BIM-FM, Infraestructura deportiva, Sostenibilidad, Mantenimiento preventivo.

RESUMEN
Este estudio evalúa la aplicación de la metodología BIM-FM como herramienta para la gestión, análisis y optimización de infraestructura deportiva existente. Se seleccionó como caso de estudio la Piscina Olímpica El Batán, ubicada en Quito – Ecuador, que presenta más de 40 años de antigüedad y carece de documentación técnica actualizada. A través de un levantamiento in situ, se generó un modelo BIM que permitió realizar simulaciones de iluminación y ventilación natural. Los resultados evidenciaron deficiencias operativas, pero también la viabilidad de mejorar su rendimiento sin necesidad de demoler. La implementación de paneles LED y claraboyas ventiladas incrementó la eficiencia energética y el confort térmico. Se concluye que BIM-FM representa una herramienta estratégica para extender la vida útil de infraestructuras deportivas, mejorar su sostenibilidad operativa y facilitar la planificación de mantenimiento preventivo, incluso en contextos con limitaciones tecnológicas. Este enfoque aporta a la gestión responsable del entorno construido con impacto ambiental y económico reducido.

KEY WORDS
BIM-FM, Sports infrastructure, Sustainability, Preventive maintenance.

ABSTRACT
This study assesses the application of the BIM-FM methodology as a tool for managing, analyzing, and optimizing existing sports infrastructure. The Olympic Pool "El Batán" in Quito, Ecuador, was selected as a case study due to its age—over 40 years—and lack of updated technical documentation. A BIM model was developed through on-site data collection, enabling lighting and natural ventilation simulations. The results revealed operational inefficiencies but also the feasibility of improving performance without requiring demolition. Implementing LED panels and ventilated skylights improved energy efficiency and thermal comfort. It is concluded that BIM-FM is a strategic tool for extending the lifespan of sports infrastructure, enhancing operational sustainability, and facilitating preventive maintenance planning, even in contexts with technological limitations. This approach contributes to responsible built environment management with reduced environmental and economic impact.

1. INTRODUCTION

The construction sector is one of the highest producers of waste and innovators of resources in Europe [1]. The environmental and economic impact generated by construction and demolition waste makes it one of the greatest challenges in the AEC industry [2]. In addition, the most significant proportion of a building's energy consumption occurs during the operation and maintenance (O&M) stage, which, although not the final stage, is the longest within the building's life cycle [3]. In light of this, sustainable building renovation is an alternative for addressing environmental problems and the energy crisis, especially given that the construction sector accounts for more than 40% of global energy consumption [4].

https://doi.org/10.29166/ingenio.v9i1.8950
2025 Universidad Central del Ecuador
CC BY-NC 4.0 —Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional
pISSN 2588-0829
eISSN 2697-3243
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

It is estimated that two-thirds of current buildings will remain in use in 2050, and more than 40% were built before 1960, when energy efficiency regulations were still in their infancy [5]. However, only between 0.5% and 1% of the global inventory is renovated annually, highlighting the urgent need to accelerate renovation processes [6]. Faced with this challenge, the AEC industry has focused its efforts on innovative construction methodologies and the use of sustainable materials, with advances such as the development of permeable paving stones, the incorporation of nanographene in mortars, and the exploration of silica nanoparticles as an alternative to Aerosil 200 [7], [8], [9]. However, there is still limited attention to comprehensive management models that enable feasible projects and ensure an effective and sustainable reduction of the environmental impact in the sector.

Most studies on Building Information Modeling (BIM) focus on the development of new projects from their planning or construction phase, neglecting its application to existing operational infrastructure [10]. Nevertheless, it is presented as a continuously developing methodology that offers several benefits during the operation and maintenance phase, such as better facility management, efficient energy use, cost-effective modernization decision-making, planned repair work, and organized demolition, among others [11]. In addition, BIM not only provides convenience for subsequent property management, but also provides effective historical information for possible renovation and expansion interventions, the development of automated processes, real-time data review, and the application of the Lean Construction philosophy [12], [13].

According to different data sources, current methods for digitizing BIM models of existing infrastructure can be divided into two categories: methods based on in situ data and methods based on external data [3]. Current techniques based on on-site data are mainly digital photogrammetry, terrestrial laser scanning, and ground-penetrating radar. These techniques involve laborious studies with manual measurement or visual assessment, are prone to errors, are time-consuming, are often unreliable, and create significant uncertainty for decision-makers [11]. On the other hand, current techniques based on external data mainly use existing construction documents, especially 2D construction drawings. A significant advantage of this type of approach is that 2D drawings contain a wealth of project information, which facilitates the creation of information-rich 3D models [3].

As a system, the BIM model of the building must reflect the actual state of the equipment, facilities, materials, and finishes, among other useful information related to operation and maintenance [13]. BIM is still immature for full adoption in remodeling projects due to technical, informational, and organizational complications [14]. The main challenges hindering progress in the implementation of BIM in existing buildings are: (1) high effort of modeling/converting captured construction data into BIM semantic objects; (2) updating information in BIM; and (3) handling uncertain data, objects, and relationships in BIM that occur in existing buildings [15], [16].

The implementation of BIM in both new and existing buildings induces profound changes in processes and information flows, but it also generates considerable advantages; the calculation of alternatives and optimizations seems promising for improving project management and risk mitigation or limiting the costs and duration of Facility Management (FM) measures[16], [17].

According to ISO 41011:2017, FM is the "organizational function that integrates people, places, and processes within the built environment for the purpose of enhancing the quality of life of people and the productivity of the core business," while the IFMA (International Facility Management Association) defines it as "the process of design, implementation, and control by which facilities are identified, specified, found, and supplied in order to provide and maintain those levels of service capable of meeting business needs, creating a quality work environment at the lowest possible cost" [18]. FM accounts for 80% of total costs during the life cycle of a building, mainly due to reactive maintenance; BIM can reduce the amount of reactive maintenance performed during operation through preventive maintenance scheduling and conflict prediction [19].

The digitization of infrastructure buildings seems to have become increasingly essential for their care and reuse; for this reason, it is necessary to increase knowledge about building assets to support sustainable maintenance and conservation strategies through the development of easy-to-use resource management tools [18].

FM can be an alternative to reduce waste generation and prolong the effectiveness of O&M processes [20]. During this phase, BIM methodology can be useful in areas such as space management, fit-out control, facility monitoring, maintenance, and repairs [21], as well as being a useful tool for the sustainable analysis of buildings, from energy consumption quantification to waste management and from the planning, administration, coordination, and evaluation of the daily operations of an infrastructure [22], [23].

There are several challenges to implementing BIM in FM, notably the lack of data or obsolete information, technical, cost, organizational, and legal challenges [5]. Previous studies have demonstrated the potential of BIM in the revitalization of heritage buildings (HBR), although it has not yet been developed to an optimal level to achieve this [24]. Open BIM approach is effective in terms of data quality, while FM allows for a balanced approach to the adaptation of heritage buildings, a solid user experience, and broader community effects, enabling efficient decision-making, creative facility design, and effective public participation [25], [26]. On the other hand, BIM has the potential to facilitate strategic decision-making by integrating a wide

range of information related to the physical condition of built assets and available resources [27], [28].

Currently, much of the information required for FM is still stored in two-dimensional physical documentation and delivered to the owner months after the facilities become operational [29]. The FM team requires access to building components to perform inspection and maintenance work in real time and remotely [30]. In response to this, studies provide a template of information required by FM professionals, detailing the main information necessary for its implementation in BIM projects [31].

Within this context, sports buildings are of great interest because they are not always built from scratch and, in some cases, involve pre-existing objects [32], [33]. The methodological recycling of structures requires careful evaluation in order to make efficient decisions that do not jeopardize the project and guarantee the expected results [34].

The use of BIM-FM in sports infrastructure management offers economic, environmental, and administrative benefits that strengthen the sustainability and efficiency of these projects. Economically, its implementation allows for precise resource management, reducing operating, maintenance, and repair costs, as well as optimizing the use of materials and extending the useful life of facilities. From an environmental perspective, BIM-FM facilitates ecological impact assessment, improves energy efficiency, reduces debris generation, and promotes the responsible use of materials, ensuring that facilities are sustainable in the long term.

At the administrative level, this digital methodology improves coordination between actors, supports informed decision-making, and enables long-range planning with high-quality results. The digitization of existing sports infrastructure opens up the possibility of implementing new management models under FM criteria, which promotes efficient maintenance, extends the useful life of facilities, and avoids unnecessary demolitions that generate waste.

The main objective of this study is to evaluate the applicability and measurable benefits of integrating BIM-FM into sports infrastructure management by quantifying improvements in operational performance, lighting efficiency, ventilation, and maintenance planning. The hypothesis is that its implementation can increase these indicators by more than 20% compared to the baseline. In this way, BIM-FM is presented as an environmentally responsible and economically viable alternative, aligned with innovation and sustainability in the construction sector.

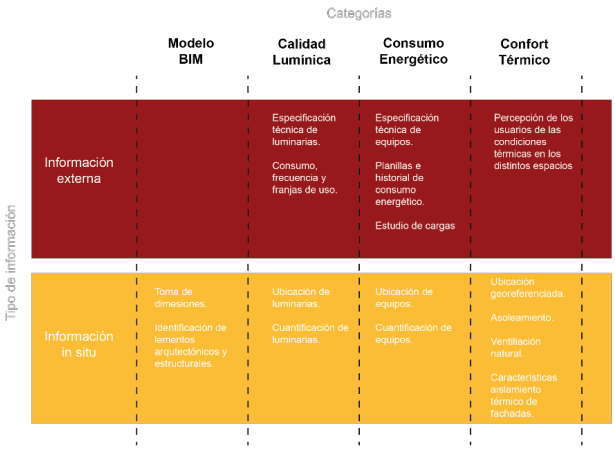
2. METHODOLOGY

The scope of this research covered only sports infrastructure that meets the following characteristics: i) current structural design life of no less than 20 years, ii) no BIM model available, iii) managed under conventional methodologies or without management, and iv) evidence of significant physical wear and tear in general.

This study was limited to assessing the benefits achieved in terms of energy consumption, lighting quality, thermal comfort, and the new advantages generated in the operation and maintenance phase. Fig. 1 details the information considered, classified according to its source.

Fig. 1.

Type and source of information collected.

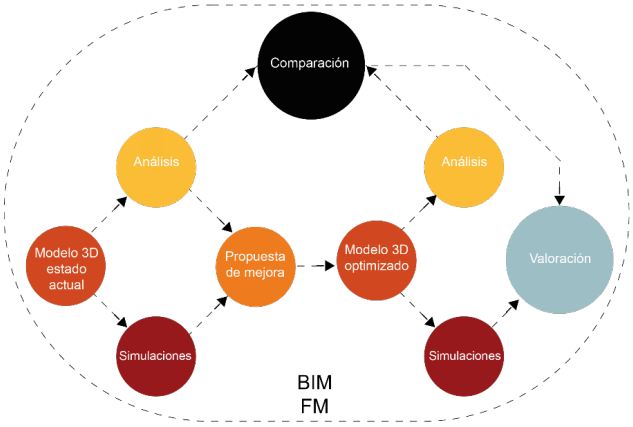


The BIM model was developed in Autodesk Revit 2023, integrating architectural, structural, and MEP layers based on a survey using manual measurements on site. Lighting simulations were performed in DIALux evo 10.1, applying the parameters established in the EN 12193 standard for sports lighting, with a calculation grid of 0.5 m and a working plane at a height of 0.85 m. The ventilation analysis was performed in Autodesk CFD 2022, using a tetrahedral mesh with an average element size of 0.25 m and boundary conditions defined according to ASHRAE 62.1. With the results obtained, the critical aspects to be addressed were determined and alternatives for improvement were proposed, which were developed in an optimized model to be analyzed again and implemented in BIM-FM in the aforementioned software. Finally, the benefits were assessed by comparing the results obtained initially with the information extracted from the enhanced model, and the investment that would be involved in implementing the identified improvement alternatives was quantified, as well as their return time.

The current environment, marked by constant transformation and instability, drives organizations to differentiate themselves by generating greater value for their customers [35]. In this context, entities that own or manage sports infrastructure must ensure that facilities are up to date and in line with the changing demands of users and visitors. The Pichincha Sports Association, one of Ecuador's most important sports organizations with more than 100 years of history, was founded with the aim of promoting sports in the province and integrating its different communities. In order for the results of the study to be replicated in other infrastructures of this entity, the

Fig. 2.

Flowchart of the methodology applied.



El Batán Olympic Swimming Pool in Quito was selected as a case study because it meets the necessary characteristics for this purpose.

Fig. 3.

Photography of El Batán Olympic Swimming Pool.

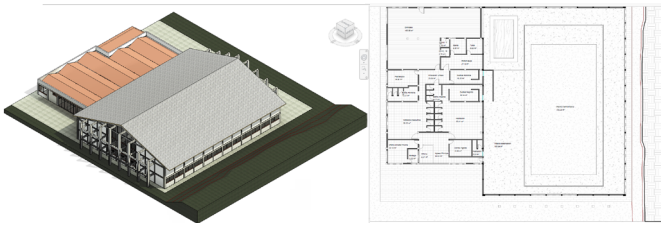
3. RESULTS AND DISCUSSION

The main objective of this study was to evaluate the applicability of the BIM-FM methodology in an existing sports facility, with the purpose of generating a digital model capable of supporting informed decisions in the management, operation, and maintenance phases. The following sections present the principal results obtained and a technical discussion of their implications for facility performance and sustainability.

One of the initial challenges identified was the inability to employ advanced surveying technologies such as terrestrial laser scanning (TLS), aerial photogrammetry, or ground-penetrating radar (GPR), due to their limited availability and high implementation costs in Ecuador. These constraints led to the adoption of a manual in-situ survey, based on direct dimension measurement and photographic documentation of the architectural and structural components.

Fig. 4.

BIM model and main floor plan of current state.



While this approach enabled the development of a functional BIM model, the level of detail achieved was constrained by the lack of access to embedded infrastructure data—such as plumbing routes, electrical conduits, and HVAC systems—which are typically critical for facility management. The absence of historical construction records further reduced modeling precision, introducing an inherent level of uncertainty that is characteristic of BIM applications in pre-existing structures [16], [17].

Despite these limitations, the model provided sufficient geometric and semantic accuracy to perform technical simulations and serve as a base for operational analysis, supporting the premise that even manually built BIM datasets can yield valuable insights when appropriately calibrated.

The visual inspection confirmed that the main metallic structure, despite its four decades of use, remains in good physical and mechanical condition, with no signs of corrosion or deformation compromising stability. This finding indicates that non-structural refurbishment strategies are both feasible and economically rational for extending the facility's lifecycle. Operationally, the building lacks a formal maintenance system, relying on reactive interventions triggered by visible deterioration or functional failure. The only available operational data consisted of electricity bills from the previous six months and spot thermal measurements taken during different times of the day for a one-month period. These observations confirm that sports infrastructures in Ecuador generally operate with limited asset management frameworks, which results in resource inefficiency and higher long-term costs.

The introduction of BIM-FM as a digital management framework thus represents an opportunity to transition from reactive to preventive maintenance, enabling the creation of a dynamic database that progressively enriches itself through real-time monitoring and documentation of interventions.

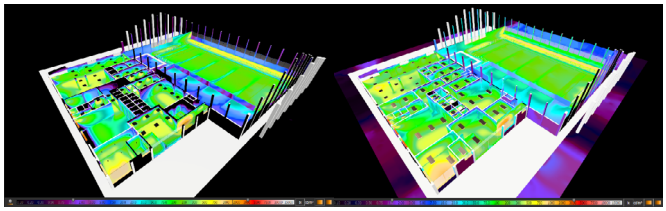
Lighting simulation conducted in DIALux Evo 13.1 revealed significant deficiencies in the existing system. The current configuration provided an average illuminance of

180 lux, with a minimum of 95 lux in secondary corridors and 215 lux over the main pool deck. These values fall below the EN 12193:2019 standard, which recommends a minimum of 250 lux for competitive swimming environments. The non-uniform light distribution resulted in a uniformity ratio (U_0) of 0.46, indicative of uneven lighting conditions and potential visual discomfort for users.

In the proposed improvement scenario, LED panel lighting (30 W, 110 lm/W) was integrated along with ventilated skylights designed to enhance both daylight penetration and passive ventilation. Simulation results demonstrated an average illuminance of 290 lux, achieving compliance with the European standard and representing a 61% improvement. Additionally, the system showed an estimated 28% reduction in energy consumption due to the higher efficiency of LED fixtures and reduced artificial lighting demand during daytime hours. The uniformity ratio improved to 0.72, indicating a more evenly distributed lighting field, beneficial for both user comfort and safety.

Fig. 5.

Current status (a) and proposed improvement (b) of lighting quality.



(a) (b)

Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations performed using Autodesk CFD 2024 revealed critical thermal zones in the pool area, characterized by air stagnation and elevated operative temperatures averaging 33°C, with localized pockets exceeding 35°C near the roof structure. These conditions stem from the absence of cross-ventilation openings and the poor thermal conductivity of the existing metallic roof. The low air velocity—below 0.2 m/s—contributed to heat accumulation and user discomfort, as well as increased evaporation rates from the pool surface.

In the improved scenario, the integration of ventilated skylights and roof panels with thermal insulation (λ = 0.035 W/m·K) substantially altered internal airflow dynamics. Average air velocity increased by 35%, reaching values between 0.25–0.35 m/s, while the operative temperature decreased to 29°C, aligning with the comfort thresholds established by ASHRAE 55 and ASHRAE 62.1. The improved airflow distribution minimized stagnant zones and created a more uniform thermal gradient, suggesting that low-cost architectural interventions can significantly enhance indoor air quality in existing sports facilities without the need for mechanical systems.

The comparative analysis between the current and improved scenarios (Table 1) confirms that targeted retrofitting interventions, informed by BIM-FM simulations, can produce substantial functional and environmental gains with relatively minor physical alterations. The lighting system achieved standard compliance, energy efficiency increased notably, and thermal comfort improved measurably, all without structural modifications.

From a management perspective, the BIM-FM framework proved effective for integrating multi-domain data (lighting, ventilation, energy) into a unified model, allowing decision-makers to visualize operational inefficiencies and quantify the potential return on investment for each improvement. This capability aligns with international research that positions BIM-FM as a strategic enabler for sustainable facility management [18], [21].

Furthermore, the findings demonstrate that in regions with technological and economic limitations, low-tech BIM applications remain a feasible path toward digital transformation in infrastructure management. The adoption of standardized data formats (IFC) ensures scalability, while progressive data enrichment can evolve into predictive maintenance models integrating IoT sensors and performance dashboards.

The outcomes of this case study demonstrate that medium-scale sports infrastructures can effectively extend their functional lifespan through data-driven, non-structural retrofits. This approach aligns with the principles of circular economy and sustainable development by minimizing demolition waste, optimizing energy performance, and reducing the environmental footprint of the built environment.

The methodological contribution of this research lies in demonstrating the feasibility of implementing BIM-FM in resource-constrained contexts, offering a replicable framework adaptable to other public or institutional facilities in Latin America. The progressive integration of facility data through BIM-FM will enable more accurate long-term planning, cost forecasting, and operational resilience, thereby transforming traditional building maintenance into a proactive, knowledge-based discipline.

4. CONCLUSIONS

This research confirms that the implementation of the BIM-FM methodology in existing sports facilities constitutes a technically feasible and methodologically robust strategy for optimizing management, maintenance, and operation processes throughout the building lifecycle. The case study developed on a semi-Olympic swimming pool over 40 years old demonstrated that, even in the absence of detailed historical documentation, it is possible to generate a functional and informative digital model that serves as a foundation for decision-making and sustainability planning.

TABLE I.
Comparative analysis of current state and proposed improvement.

Parameter	Current State	Improved Scenario	Variation	Standard Reference
Average illuminance (lux)	180	290	+61%	EN 12193 ≥ 250 lux
Uniformity ratio (U_0)	0.46	0.72	+57%	EN 12464-1 ≥ 0.6
Estimated energy consumption (kWh/month)	2,140	1,540	−28%	—
Air velocity in pool deck (m/s)	0.18	0.27	+35%	ASHRAE 62.1: 0.25–0.35
Average temperature (°C)	33	29	−12%	ASHRAE 55: 28–30
Estimated CO_2 emissions (kg/year)*	4,200	3,000	−29%	—

The quantitative outcomes derived from the model simulations validate the effectiveness of BIM-based analyses. Lighting optimization through the integration of LED technology and ventilated skylights produced an average 61% improvement in illuminance, increased uniformity from 0.46 to 0.72, and achieved an estimated 28% reduction in energy consumption. Similarly, the application of passive ventilation strategies yielded a 35% increase in air velocity, reducing stagnant zones below 0.2 m/s, and a 4°C decrease in average indoor temperature, aligning with ASHRAE comfort standards. These results confirm that targeted, non-structural interventions can substantially improve the environmental and operational performance of aging facilities without requiring large-scale reconstruction.

From an operational management perspective, the incorporation of BIM-FM marks a transition from a reactive maintenance approach—based on corrective interventions—to a preventive and predictive model, where technical data are continuously recorded, updated, and analyzed. This paradigm shift enables the establishment of data-driven maintenance plans, real-time monitoring dashboards, and historical records that enhance transparency, efficiency, and traceability in facility management processes. The digital twin thus becomes a strategic asset that evolves with each operational cycle, improving long-term planning and resource allocation.

Moreover, the study highlights that even under technological and economic limitations, low-tech BIM implementations can produce high-impact outcomes. The methodology demonstrated its adaptability to contexts with scarce documentation, confirming that its success depends more on structured processes and data interoperability than on advanced hardware availability. In this regard, the use of open formats such as IFC ensures scalability, while the progressive enrichment of the model supports continuous improvement in facility operations.

In broader terms, this research contributes to the ongoing discussion on the sustainable management of existing infrastructure, particularly in the Global South. The BIM-FM framework provides a tangible path toward reducing environmental impact by extending the useful life of buildings, minimizing construction waste, and lowering energy demand. Its adoption aligns with global sustainability objectives and supports the circular economy principles advocated by contemporary building management standards.

Finally, the results suggest several lines for future research and application. First, integrating IoT and sensor-based monitoring systems with the BIM-FM environment could enhance real-time data acquisition and predictive maintenance capabilities. Second, expanding this methodology to other types of public and educational facilities would validate its scalability and adaptability. Third, the combination of BIM-FM with cost-benefit and lifecycle analysis tools would provide decision-makers with a more comprehensive understanding of the economic and environmental returns of renovation projects.

In conclusion, the implementation of BIM-FM in existing sports infrastructures represents not only a tool for improving operational performance but also a transformative management approach that fosters informed decision-making, sustainability, and resilience. As digital technologies evolve and become more accessible, their integration into the Facility Management domain will play a decisive role in the responsible modernization of the built environment across developing regions.

REFERENCES

[1] Z. Zhang, W. Pan, and M. Xie, "Systematic key performance indicators for measuring modular integrated construction," in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, Thomas Telford Ltd, 2022, pp. 113–128.

[2] M. Aslam, Z. Gao, and G. Smith, "Exploring factors for implementing lean construction for rapid initial successes in construction," *J Clean Prod*, vol. 277, p. 123295, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123295.

[3] Y. Zhao, X. Deng, and H. Lai, "Reconstructing BIM from 2D structural drawings for existing buildings," *Autom Constr*, vol. 128, p. 103750, 2021.

[4] C. He, Y. Hou, L. Ding, and P. Li, "Visualized literature review on sustainable building renovation," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, p. 102622, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.102622.

[5] L. D'Angelo, M. Hajdukiewicz, F. Seri, and M. M. Keane, "A novel BIM-based process workflow for building retrofit," *Journal of Building Engineering*, vol. 50, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.104163.

[6] L. Meeus, I. Azevedo, C. Marcantonini, J.-M. Glachant, and M. Hafner, "EU 2050 Low-Carbon Energy Future: Visions and Strategies," *The Electricity Journal*, vol. 25, no. 5, pp. 57–63, 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.05.014.

[7] M. Alvansazyazdi *et al.*, "Innovación en infraestructura sostenible: análisis avanzado de las propiedades mecánicas de adoquines permeables para una construcción resiliente y ecoeficiente," *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, vol. 19, no. 1, p. e7948, Jun. 2025, doi: 10.29166/revfig.v19i1.7948.

[8] M. Alvansazyazdi *et al.*, "Enhancing Sustainable Construction: An Evaluation of Nano-Graphene's Effectiveness in Mortar Composition," *Int. J. Eng. Technol. Sci*, vol. 2024, pp. 1–18, 2024.

[9] M. Alvansazyazdi *et al.*, "Advancing Sustainable Construction: Analysis and Evaluation of Replacing Aerosil 200 Nano-Silica with Rice Husk Ash Nano-Silica in High-Strength ConcreteFomento de la construcción sostenible: análisis y evaluación de la sustitución de nanosílice Aerosil 200 por nanosílice de ceniza de cáscara de arroz en hormigón de alta resistencia," *Eídos*, vol. 18, pp. 43–66, Jul. 2025, doi: 10.29019/eidos.v18i26.1567.

[10] M. Krämer and Z. Besenyői, "Towards Digitalization of Building Operations with BIM," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 365, no. 2, p. 022067, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/365/2/022067.

[11] M. A. Hossain and J. K. W. Yeoh, "BIM for existing buildings: potential opportunities and barriers," in *IOP Conference series: materials science and engineering*, IOP Publishing, 2018, p. 012051.

[12] V. Fernández-Mora, I. J. Navarro, and V. Yepes, "Integration of the structural project into the BIM paradigm: A literature review," *Journal of Building Engineering*, vol. 53, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.104318.

[13] Q. Meng *et al.*, "A review of integrated applications of BIM and related technologies in whole building life cycle," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 27, no. 8, pp. 1647–1677, 2020.

[14] M. Khaddaj and I. Srour, "Using BIM to retrofit existing buildings," *Procedia Eng*, vol. 145, pp. 1526–1533, 2016.

[15] M. J. Barbosa, P. Pauwels, V. Ferreira, and L. Mateus, "Towards increased BIM usage for existing building interventions," *Structural Survey*, vol. 34, no. 2, pp. 168–190, 2016.

[16] R. Volk, J. Stengel, and F. Schultmann, "Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs," *Autom Constr*, vol. 38, pp. 109–127, 2014.

[17] J. J. McArthur, "A building information management (BIM) framework and supporting case study for existing building operations, maintenance and sustainability," *Procedia Eng*, vol. 118, pp. 1104–1111, 2015.

[18] A. Salzano, C. M. Parisi, G. Acampa, and M. Nicolella, "Existing assets maintenance management: Optimizing maintenance procedures and costs through BIM tools," *Autom Constr*, vol. 149, p. 104788, 2023.

[19] S. Durdyev, M. Ashour, S. Connelly, and A. Mahdiyar, "Barriers to the implementation of Building Information Modelling (BIM) for facility management," *Journal of Building Engineering*, vol. 46, p. 103736, 2022.

[20] A. Michalski, E. Głodziński, and K. Böde, "Lean construction management techniques and BIM technology–systematic literature review," *Procedia Comput Sci*, vol. 196, pp. 1036–1043, 2022.

[21] M. K. Dixit, V. Venkatraj, M. Ostadalimakhmalbaf, F. Pariafsai, and S. Lavy, "Integration of facility management and building information modeling (BIM)," *Facilities*, vol. 37, no. 7/8, pp. 455–483, Jan. 2019, doi: 10.1108/F-03-2018-0043.

[22] M. S. Alghamdi, T. H. Beach, and Y. Rezgui, "Reviewing the effects of deploying building information modelling (BIM) on the adoption of sustainable design in Gulf countries: a case study in Saudi Arabia," *City, Territory and Architecture*, vol. 9, no. 1, p. 18, 2022, doi: 10.1186/s40410-022-00160-7.

[23] Z. Getu, "A Qualitative Report of Sport Facilities Management," *Return : Study of Management, Economic and Bussines*, vol. 1, Mar. 2023, doi: 10.57096/return.v1i04.53.

[24] D. P. Pocobelli, J. Boehm, P. Bryan, J. Still, and J. Grau-Bové, "BIM for heritage science: a review," *Herit Sci*, vol. 6, p. 30, 2018, doi: 10.1186/s40494-018-0191-4.

[25] L. Jozef, N. Oostwegel, Š. Jaud, S. Muhič, and K. M. Rebec, "Digitalization of culturally significant buildings: ensuring high-quality data exchanges in the heritage domain using OpenBIM," 2022, doi: 10.1186/s40494-021-00640-y.

[26] H. Hou and H. Wu, "A case study of facilities management for heritage building revitalisation," *Facilities*, vol. 38, no. 3/4, pp. 201–217, Jan. 2020, doi: 10.1108/F-02-2019-0020.

[27] Z. Peng, S. Zhao, L. Shen, Y. Ma, Q. Zhang, and W. Deng, "Retrofit or rebuild? The future of old residential buildings in urban areas of China based on the analysis of environmental benefits," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 16, no. 4, pp. 1422–1434, Dec. 2021, doi: 10.1093/ijlct/ctab070.

[28] N. Wanigarathna, K. Jones, A. Bell, and G. Kapogiannis, "Building information modelling to

support maintenance management of healthcare built assets," *Facilities*, vol. 37, no. 7/8, pp. 415–434, Jan. 2019, doi: 10.1108/F-01-2018-0012.

[29] R. Bortolini, N. Forcada, and M. Macarulla, *BIM for the integration of Building Maintenance Management: A case study of a university campus*. 2016.

[30] G. Guzman Ganto and W. Ulloa, *BIM Application in the Operation and Maintenance Management of a Sports Infrastructure*. 2020. doi: 10.24928/2020/0015.

[31] S. Ashworth, M. Tucker, and C. K. Druhmann, "Critical success factors for facility management employer's information requirements (EIR) for BIM," *Facilities*, vol. 37, no. 1/2, pp. 103–118, Jan. 2019, doi: 10.1108/F-02-2018-0027.

[32] A. B. A. Altohami, N. A. Haron, A. H. Ales@ Alias, and T. H. Law, "Investigating approaches of integrating BIM, IoT, and facility management for renovating existing buildings: a review," *Sustainability*, vol. 13, no. 7, p. 3930, 2021.

[33] N. Wilson, A. Thomson, and P. Riches, "Development and presentation of the first design process model for sports equipment design," *Res Eng Des*, vol. 28, no. 4, pp. 495–509, 2017, doi: 10.1007/s00163-017-0257-4.

[34] G. Assefa and C. Ambler, "To demolish or not to demolish: Life cycle consideration of repurposing buildings," *Sustain Cities Soc*, vol. 28, pp. 146–153, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.SCS.2016.09.011.

[35] H. Alvansaz, M. Hakakian, M. Alvansazyazdi, N. E. S. Reyes, and A. M. C. Solórzano, "An Investigation and Presentation of a Model for Factors Influencing the Agility of Human Resources a Case Study of Yazd Electricity Distribution Company to Springer Proceedings," in *Information Technology and Systems*, Á. Rocha, C. Ferrás, and M. Paredes, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 823–834.

[36] A. Mohammadfarid, N. E. Salgado Reyes, A. H. Borghei, A. M. Camino Solórzano, M. S. Guzmán Rodríguez, and M. A. Rivera Valenzuela, "Web-Based Executive Dashboard Reports for Public Works Clients in Construction Industry," in *New Knowledge in Information Systems and Technologies*, Á. Rocha, H. Adeli, L. P. Reis, and S. Costanzo, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 285–294.

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

INGENIO
2026, VOL 9(1), ENERO - JUNIO, PP. 097-106

REVISTA INGENIO

Sistemas Logísticos Integrales: Impacto en la Competitividad y en el Desempeño de las Cadenas de Suministros

Integrated Logistics Systems: Impact on Supply Chain Competitiveness and Performance

Luz María Valdez Lima | Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, UNEXPO-Vicerrectorado Puerto Ordaz, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Puerto Ordaz-Venezuela
Franyelit Suárez-Carreño | Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Ciencias Físicas y Matemáticas Quito, Ecuador

Recibido: 8/8/2025
Recibido tras revisión: 19/9/2025
Aceptado: 10/10/2025
Publicado: 28/1/2026

PALABRAS CLAVE
Logística, Gestión Integrada, Cadena de suministro, Eficiencia, Ventaja Competitiva.

RESUMEN
En un entorno global volátil, la necesidad de redefinir la gestión logística hacia un enfoque integrado busca maximizar la eficiencia y minimizar costos. En este trabajo se analizan los Sistemas Logísticos Integrales y su impacto en el desempeño y la competitividad en cadenas de suministros modernas, identificando estrategias que favorecen su implementación, los marcos de medición más utilizados y la influencia de la Industria 4.0 en este contexto. La metodología empleada consistió en una revisión sistemática de literatura bajo directrices PRISMA. Los resultados indican que los Sistemas Logísticos Integrales son una visión avanzada de gestión estratégica que optimiza flujos y valores, siendo la integración el elemento fundamental para mejorar el rendimiento, la resiliencia y la competitividad de las cadenas de suministros.

KEY WORDS
Logistics, Integrated Management, Supply chains, Efficiency, Competitive advantage.

ABSTRACT
In a volatile global environment, the need to redefine logistics management towards an integrated approach seeks to maximize efficiency and minimize costs. This paper analyzes Integrated Logistics Systems and their impact on performance and competitiveness in modern supply chains, identifying strategies that favor their implementation, the most frequently used measurement frameworks, and the influence of Industry 4.0 in this context. The methodology employed consisted of a systematic literature review following PRISMA guidelines. The results indicate that Integrated Logistics Systems represent an advanced strategic management vision that optimizes flows and values, with integration being the fundamental element for improving the performance, resilience, and competitiveness of supply chains.

1. INTRODUCCIÓN

En el entorno global actual, caracterizado por su alta competitividad, dinamismo y constante cambio, las organizaciones enfrentan la necesidad de redefinir sus enfoques tradicionales de gestión logística [1] para incrementar su eficiencia y disminuir los costos operativos [2]. El enfoque centrado en coordinar procesos específicos desde la procura de insumos hasta la entrega final del bien o servicio, comprende la concepción clásica de la gestión de la cadena de suministro que además suele emplear predominantemente los términos cadena de suministro integrada o gestión integrada de la cadena de suministro [3], [4]; dicho concepto evoluciona hacia un marco más amplio y estratégico conocido como Sistemas Logísticos Integrales (SLI) que busca enfatizar una perspectiva más holística y de gestión estratégica que abarca la interconexión profunda de las diversas funciones logísticas y actores a lo largo de toda la cadena de valor. Este nuevo enfoque reconoce

https://doi.org/10.29166/ingenio.v9i1.8610
2025 Universidad Central del Ecuador
CC BY-NC 4.0 —Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional
pISSN 2588-0829
eISSN 2697-3243
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

la complejidad de la coordinación del intercambio optimizado de materiales, información, servicios, recursos y conocimientos desde la red de proveedores hasta los clientes nales [3], [4].

Cuando hablamos de la cadena de suministro con enfoque integral nos referimos a un conjunto de empresas independientes con habilidades complementarias e integradas[3]. El creciente interés por la integración responde a la complejidad del escenario global, la competitividad y la innovación [2]. Más aún, las disrupciones recientes han subrayado la urgencia de adoptar este marco integral. La pandemia ocasionada por el COVID-19 demostró la fragilidad de las cadenas lean optimizadas solo por costo, exponiendo la necesidad crítica de resiliencia y exibilidad ante shocks sistémicos [5]. De manera similar, las tensiones geopolíticas y los con ictos han impulsado la regionalización y el re-shoring, obligando a las organizaciones a recon gurar sus redes de proveedores y producción bajo una perspectiva más estratégica [5]. Es en este contexto disruptivo la implementación exitosa de los Sistemas Logísticos Integrales (SLI) se convierte en un factor decisivo de supervivencia y ventaja competitiva [6], [7].

El manejo sistematizado de todas las funciones logísticas, incluyendo transporte, almacenamiento, gestión de inventarios, información y servicios relacionados, en un solo sistema complejo, busca optimizar la e ciencia, la exibilidad y la capacidad de respuesta del conjunto [8]. Esto permite no solo mejorar el rendimiento operacional, sino también adaptarse de manera más efectiva a los cambios abruptos y volátiles del entorno, al proporcionar mayor agilidad, maximizando sus recursos e incrementando su capacidad de adaptación en un contexto cada vez más interconectado y desa ante [9].

En este trabajo de investigación se pretenden destacar los factores de éxito y los desafíos reportados en la implementación de los sistemas logísticos integrados, así como identi car el impacto en la competitividad y el rendimiento de éstos en la industria moderna; todo con la nalidad de proponer futuras líneas de investigación basadas en las brechas identi cadas y áreas menos exploradas.

2. METODOLOGÍA

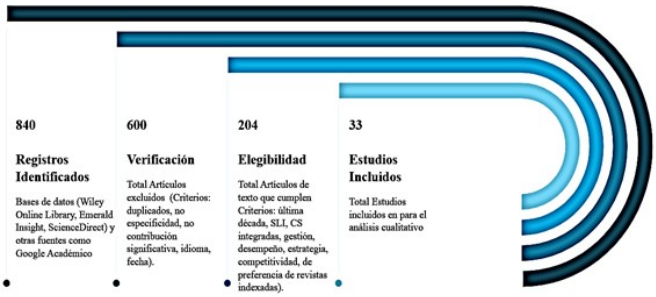
La presente revisión de la literatura se llevó a cabo siguiendo los principios y directrices de la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para asegurar la transparencia, el rigor metodológico y la reproducibilidad del proceso de búsqueda, selección y síntesis de la evidencia disponible.

2.1. PROCESO DE LA REVISIÓN DE LA LITERATURA

La fig. 1 ilustra el proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión nal de los estudios considerados. El diagrama resume de manera visual y estructurada las distintas etapas aplicadas para garantizar la rigurosidad metodológica y la trazabilidad del proceso de revisión sistemática.

Fig. 1.

Esquema del proceso de la revisión de la literatura empleando el método PRISMA



2.1.1. Registros identificados (n = 840)

En esta primera etapa se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas indexadas como Wiley Online Library, Emerald Insight y ScienceDirect, así como en repositorios de acceso libre como Google Académico. Esta búsqueda incluyó artículos publicados durante la última década y priorizó fuentes cientí cas relevantes para los temas asociados con los sistemas logísticos integrales, cadenas de suministros integradas, gestión de la cadena de suministro y la logística, desempeño y estrategias de integración para la competitividad.

Se utilizaron palabras clave y términos de búsqueda cuidadosamente seleccionados para garantizar la relevancia de la bibliografía recopilada. Tanto en español como en ingles términos como: “red logística integrada”, “gestión de la cadena de suministro”, “e ciencia de las cadenas de suministro”, “integrated logistics network”, “supply chain integration”, “logistics supply chain integration”, “supply chain integration and performance”, “evolution of logistics and supply chain management”, los cuales se combinaron sistemáticamente para la obtención de artículos relevantes.

2.1.2. Verificación y depuración (n = 600 artículos excluidos)

Se aplicaron criterios de exclusión estrictos para filtrar documentos duplicados, publicaciones sin especi cación metodológica clara, estudios que no aportan contribuciones signi cativas al objeto de estudio, o artículos en idiomas distintos del español e inglés. Esta fase permitió conservar únicamente los textos más pertinentes desde el punto de vista temático y cientí co.

2.1.3. Evaluación de elegibilidad (n = 204)

En esta fase se revisó el texto completo de los artículos restantes, aplicando criterios de inclusión centrados en: (i) pertinencia temática con sistemas logísticos integrales y cadenas de suministro; (ii) contribuciones explícitas en gestión, integración, competitividad o desempeño; (iii) pertenencia a revistas cientí cas indexadas y (iv) en alineación con los objetivos de esta investigación doctoral.

TABLA I.

Criterios de inclusión y exclusión aplicados en la investigación

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
Artículos publicados en la última década (2015–2024).	Publicaciones anteriores a 2015.
Estudios enfocados en Sistemas Logísticos Integrales (SLI) o cadenas de suministro (CS).	Estudios que no abordan directamente SLI, CS o sus componentes.
Enfoque en variables como desempeño, competitividad, integración de las CS, estrategia o gestión en SLI.	Textos sin relevancia conceptual o metodológica para los objetivos del estudio.
Artículos arbitrados, publicados en revistas cientí cas indexadas (Scopus, WoS, etc.).	Publicaciones no arbitradas, no cientí cas o no veri cables.
Textos disponibles en idioma español o inglés.	Artículos en idiomas distintos al español o inglés.
Estudios con metodología clara y justi cada (cualitativa, cuantitativa o mixta).	Documentos sin especi cación metodológica o con ambigüedad en su diseño de investigación.
Acceso abierto o completo al texto para su revisión total.	Textos sin acceso completo o con restricción de lectura.
Aplicación a entornos organizacionales reales o modelados.	Estudios puramente teóricos sin conexión con aplicaciones reales.

2.1.4. Estudios incluidos en el análisis cualitativo (n = 33)

Finalmente, se seleccionaron 33 estudios que cumplieron con los criterios que hemos de nido. Estos artículos fue ron incluidos en la base del análisis temático y conceptual, y constituyen el corpus fundamental sobre el cual se desa rrollan los hallazgos de esta investigación. La diversidad disciplinaria, metodológica y geográ ca de estos estudios enriquece la discusión e interpretación de los resultados.

2.2. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS DOCUMENTOS

El objetivo de la evaluación de calidad consiste en determinar el grado de solidez metodológica, claridad conceptual, pertinencia temática y aplicabilidad de los estudios incluidos, a n de asegurar que los documentos analizados aporten una base con able para la discusión y síntesis cualitativa (Ver Tabla 2). Para llevar a cabo este proceso, se elaboró una lista estructurada de preguntas de evaluación con base a criterios adaptados de modelos reconocidos en revisiones sistemáticas, como los propuestos por CASP (Critical Appraisal Skills Programme) [10].

2.2.1. Procedimiento de aplicación de las preguntas

A continuación, se describe el procedimiento llevado a cabo para la aplicación de las preguntas que permitieron evaluar la calidad de los documentos:

- Cada estudio incluido en la revisión fue evaluado de forma independiente por las dos investigadoras.
- Las discrepancias fueron discutidas en sesión conjunta, hasta llegar a consenso.
- Para ser considerado de alta calidad, un documento debía obtener la cali cación “Sí” en al menos 8 de los 10 criterios.
- Aquellos estudios con entre 5 y 7 respuestas a r mativas fueron considerados de calidad media, y se incluyeron solo si aportaban una perspectiva teórica o contextual valiosa.
- Los documentos con menos de 5 respuestas po sitivas fueron excluidos por considerarse insu cientes en términos metodológicos o de relevan cia temática.

2.2.2 Resultados de la evaluación de calidad

Tras aplicar este proceso, se clasificaron los estudios de la siguiente manera:

- Alta calidad: 33 estudios
- Calidad media: 21 estudios
- Baja calidad / excluidos: 150 estudios

Los documentos clasi cados como de calidad media fue ron tomados en cuenta únicamente como material de apo yo contextual, sin ponderación dominante en la síntesis principal de resultados. Esta estrategia metodológica ase guró que la evidencia incluida en esta revisión sistemática no solo fuese pertinente, sino también sólida desde el pun to de vista cientí co, minimizando sesgos y garantizando una base con able para las interpretaciones nales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESULTADOS

3.1.1. Evolución del enfoque de gestión de la cadena de suministro

La gestión de la cadena de suministro ha transitado por diferentes enfoques orientados hacia la integración de los diferentes agentes con los que interactúa [6]. Se busca

TABLA II.

Preguntas utilizadas para evaluar la calidad de los documentos

Criterio	Pregunta de evaluación	Tipo de respuesta
Claridad del objetivo	¿El estudio tiene un objetivo claro y específico?	Sí / Parcial / No
Pertinencia temática	¿La temática del estudio se relaciona directamente con sistemas logísticos, gestión de la CS, competitividad y rendimiento?	Sí / Parcial / No
Diseño metodológico	¿El estudio presenta una metodología claramente de nida y adecuada a su objetivo?	Sí / Parcial / No
Validez de los resultados	¿Los resultados están sustentados con datos, análisis y argumentos veri cables?	Sí / Parcial / No
Razonamiento lógico y estructura argumental	¿El razonamiento del estudio es coherente, lógico y bien estructurado?	Sí / Parcial / No
Aplicabilidad	¿Los hallazgos del estudio pueden aplicarse o adaptarse a otros contextos logísticos o estratégicos?	Sí / Parcial / No
Actualidad del documento	¿El estudio fue publicado en los últimos 10 años y se encuentra actualizado según los avances del campo?	Sí / Parcial / No
Rigurosidad científica	¿El documento fue publicado en una revista arbitrada o índice reconocido (Scopus, WoS, etc.)?	Sí / Parcial / No
Nivel de evidencia	¿El estudio es empírico (cuantitativo o cualitativo), con base en datos o análisis documentado?	Sí / Parcial / No
Transparencia de fuentes y datos	¿El estudio indica claramente las fuentes de información y los procedimientos utilizados?	Sí / Parcial / No

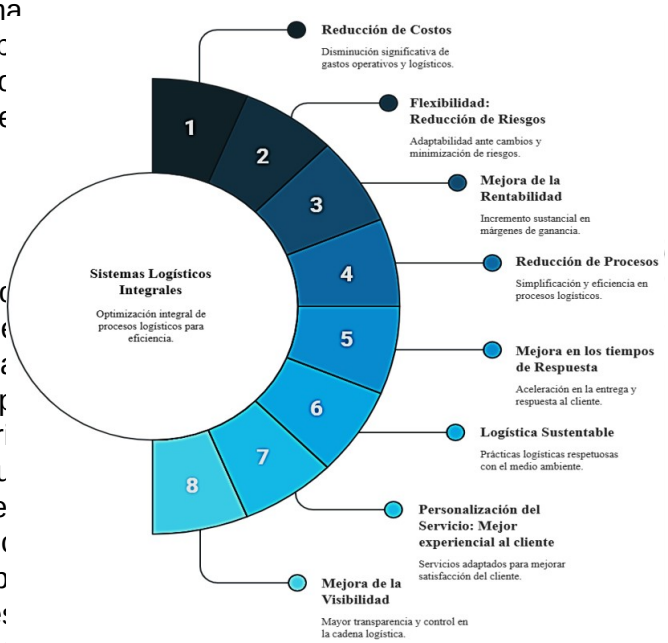
establecer sistemas capaces, no solo de facilitar la ejecución de actividades conjuntas, sino que, además requiere de la implementación de estrategias que permitan obtener mayor capacidad de adaptación y competitividad. En la tabla 3 se muestra los resultados de la investigación orientados a mostrar la evolución del enfoque de la gestión de la cadena de suministro hacia los sistemas logísticos integrales.

3.1.2. Sistemas logísticos integrales como ventaja competitiva

En la actualidad el desempeño general de una cadena de suministro aborda adicionalmente términos de aspectos ambientales, sociales y económicos [16]. Esto es un elemento crucial para las organizaciones que buscan alcanzar objetivos de desarrollo sostenible y al mismo tiempo obtener ventajas competitivas en el entorno empresarial actual globalizado [17]. A continuación, se presenta un diagrama conceptual (ver Fig. 2) que ilustra de manera concisa cómo la implementación de un sistema logístico integral se traduce en una ventaja competitiva sostenible. La imagen resume los hallazgos principales de la investigación, destacando los pilares fundamentales que surgen de la integración logística, tales como reducción de costos, mejora de la visibilidad, incremento de la rentabilidad, simplificación de procesos, optimización en los tiempos de respuesta, adopción de prácticas logísticas sostenibles, personalización del servicio al cliente y una mayor visibilidad de la cadena de suministro.

Fig. 2.

Sistemas Logísticos Integrales como ventaja competitiva.



3.1.3. Mejoras en el rendimiento de las cadenas de suministro con enfoque integrador

A continuación, la tabla 4 resume el aporte de las referencias consultadas para esta investigación en cuanto al rendimiento de las cadenas de suministro al adoptar el enfoque integrador, al igual que se evidencia su relevancia científica.

TABLA III.

Evolución hacia los sistemas logísticos integrales (sli)

Referencia	Tema	Aporte Principal	Relevancia Cientí ca en Niveles	Aporte a la Investigación
[2]	Cadena de Suministro Tradicional	De ne la CS como secuencia lineal de procesos (procura a entrega).	Fundamento del concepto inicial.	Proporciona el punto de partida para la evolución conceptual.
[6]	Transición GCS	Destaca la necesidad de integración y coordinación profunda por la globalización.	Impulsor de la evolución a enfoques integrados.	Justi ca el cambio hacia modelos de CS más complejos.
[3]	Cadena de Suministro Integrada (CSI)	Conceptualiza la CSI como gestión coordinada de ujos (información, productos, etc.) desde proveedores a clientes.	Desarrollo del concepto de integración en CS.	Provee una de nición clave de CSI, base para los SLI.
[4]	Cadena de Suministro Integrada (CSI)	Rea rma la importancia de la coordinación de ujos y procesos en la CSI.	Consolidación del concepto de CSI.	Refuerza la conceptualización de la CSI como predecesora de los SLI.
[11]	Sistemas Logísticos Integrales (SLI)	Propone los SLI con énfasis en la integración tecnológica y de procesos para e ciencia de recursos.	Avance hacia la dimensión tecnológica en logística.	Introduce y sustenta la visión de SLI con enfoque en tecnología y procesos.
[12]	Sistemas Logísticos Integrales (SLI)	Contribuye a los SLI enfocados en la optimización del valor y mayor coordinación interna/externa.	Aporta al objetivo estratégico de los SLI.	Resalta el n de los SLI: maximizar valor y coordinación.
[13]	Sistemas Logísticos Integrales (SLI)	Describe SLI como un sistema cohesionado que optimiza ujos (material, información, valor) para exibilidad y e ciencia.	Detalla la naturaleza sistémica y bene cios clave de los SLI.	Ofrece una visión integral de los SLI, sus objetivos y resultados.
[14]	Funciones de los SLI	Identi ca la plani cación como una actividad central de los SLI.	Aclara componentes operacionales de los SLI.	Detalla aspectos especí cos del funcionamiento de los SLI.
[15]	Objetivos de los SLI	Añade que los SLI buscan satisfacer al cliente y construir resiliencia en la red.	Amplía la visión estratégica de los SLI.	Contribuye a los nes estratégicos de los SLI en adaptabilidad y servicio.

TABLA IV.

Aporte a la investigación del rendimiento en cadenas de suministro integradas.

Referencia	Tema Principal	Aporte a la Investigación	Relevancia Cientí ca
[18]	Definición y estrategias de mejora del rendimiento de la CS	- Conceptualizar el rendimiento de la CS - Importancia de la creación de valor	Conceptualización inicial del rendimiento de la CS.
[17]	Estrategias para incrementar el rendimiento de la CS	- Identi ca estrategias clave como la asociación, colaboración, y la integración.	De ne estrategias aplicables para la mejora del rendimiento.
[19]	Enfoque en los SLI para la mejora del rendimiento de la operación logística y el desempeño organizacional.	- Importancia de los SLI como pilar para la mejora del rendimiento logístico y organizacional.	Relevancia de los SLI en el rendimiento de la CS.
[20]	Integración de la CS e Industria 4.0, y su impacto en el rendimiento.	Integración de datos y enfoque colaborativo a través de la Industria 4.0	Destaca el papel de la tecnología y la Industria 4.0 en la optimización de la CS.
[2]	Integración de la CS y la gestión de relaciones con el cliente.	In uencia de los SLI en el desempeño organizacional, para la comprensión del alcance integración.	Aporta a la visión de la integración de la CS.
[6]	Evolución de la CS: teoría, conceptos y ciencia.	Refuerza la importancia del enfoque en los SLI para la mejora del rendimiento.	Contribuye al marco teórico de la evolución de la CS.
[21]	Gestión del rendimiento logístico en CS textiles: mejores prácticas y barreras.	- In uencia directa de los SLI en el rendimiento de la CS - Marcos de medición del rendimiento.	Proporciona herramientas y marcos para la medición del rendimiento logístico.
[22]	Rendimiento integrado de la CS en el sector sanitario.	- Enfoque integrado que promueve comunicación abierta, con anza mutua e intercambio de información.	Ejemplo de aplicación de la integración para el rendimiento.
[23]	Relación entre la resiliencia de la CS, la integración y el rendimiento.	- Conexión entre la integración y la resiliencia para lograr un rendimiento capaz de soportar disrupciones.	Investiga la relación entre resiliencia, integración y rendimiento.
[24]	Efecto de la CS digital en el rendimiento organizacional.	- Necesidad de métricas diversas para visión holística del rendimiento. - Impacto de la Industria 4.0 en el rendimiento logístico.	Impacto de la digitalización y la Industria 4.0 en el rendimiento.
[25]	Medición del rendimiento logístico de las CS hospitalarias internas.	- Enfoque hacia la toma de decisiones multicriterio para evaluar el rendimiento.	Metodología de medición del rendimiento logístico.
[26]	Modelo de medición del rendimiento de la CS	- Prioridad en datos nancieros y no nancieros en la medición del rendimiento.	Evolución de los modelos de medición del rendimiento.
[27]	Cómo prosperan las mejores CS	Fondo de maniobra como indicador de rendimiento para operaciones logísticas globales.	Nueva perspectiva nanciera en el rendimiento logístico.
[16]	Gestión de la logística verde en la sostenibilidad y el rendimiento de la CS	- Importancia de los aspectos ambientales, sociales y económicos en el desempeño general de la CS para la sostenibilidad.	Dimensiona la sostenibilidad en el rendimiento de la CS.
[28]	Impacto de la Industria 4.0 en el rendimiento de la CS.	Implementación de las TI y la industria 4.0 para: - Agilizar operaciones - Fomentar exibilidad y resiliencia - Facilitar la colaboración y comunicación en tiempo real.	Evidencia el impacto transformador de la tecnología en el rendimiento de la CS.
[9]	Modelo de integración de la CS colaborativa.	La tecnología facilita el desarrollo de modelos informáticos para la administración estratégica del sistema logístico.	Proporciona un modelo para la integración colaborativa.

3.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El concepto tradicional de la Cadena de Suministro la identi ca como una secuencia lineal de procesos, desde la procura hasta la entrega [2]. A partir de la necesidad de satisfacer los requerimientos de una nueva demanda caracterizada por una gestión coordinada de múltiples ujos, incluyendo información, productos, recursos y conocimientos [6] emerge el concepto de Cadena de Suministro Integrada [3] que de igual manera se extiende desde la red de proveedores hasta los clientes [4]there is a lack of consensus in current literature to de ne and conceptualize supply chain integration (SCI. La consolidación de este enfoque rea rmó su importancia como base para lo que vendrían a ser los Sistemas Logísticos Integrales. Esta nueva visión representa un nivel superior del concepto original, haciendo énfasis en la integración tecnológica [11] y de procesos para optimizar la e ciencia de los recursos. Estos sistemas buscan maximizar el valor y la coordinación tanto interna como externa [12], con el objetivo estratégico de lograr una mayor adaptabilidad y competitividad. Los sistemas logísticos integrales se conciben entonces como sistemas cohesionados que optimizan las actividades que facilitan la interconexión de los diferentes actores de la cadena de suministro, promoviendo estrategias de exibilidad y e ciencia [13]. Además, la plani cación se identi ca como una actividad central dentro de las funciones de los sistemas logísticos, y sus objetivos estratégicos se amplían para no solo satisfacer al cliente, sino también para construir resiliencia en toda la red [15].

El enfoque interconectado y cooperativo no es simplemente una práctica operativa, sino una estrategia distintiva que con ere una ventaja competitiva sostenible a las organizaciones [29], [30] y un mayor rendimiento [19], [20], [21] que trasciende la mera e ciencia, posicionando a la empresa en el mercado global [31]. Los principales factores de éxito para la implementación de los sistemas logísticos integrales identi cados en la literatura se derivan de la integración interna y externa de la cadena de suministro [29], [30], [31].

La integración interna garantiza que las funciones logísticas y operativas de una organización actúen como un todo coordinado, eliminando redundancias y optimizando el ujo de trabajo [3], [18]. Esta coherencia interna es la base sobre la cual se construye una capacidad de respuesta superior y la utilización e ciente de los recursos [2], lo que se traduce directamente en una estructura de costos favorable y una mayor agilidad frente a las nuevas demandas del mercado [17]. La cooperación entre departamentos a través del intercambio de información y toma de decisiones conjuntas [31], la creación de una red colaborativa de la logística [30] y la creación de un sistema de toma de decisiones basadas en datos son algunas de las prácticas de integración interna identi cadas como exitosas en la literatura.

Por otro lado, la integración externa de los sistemas logísticos integrales enfatiza la implementación de prácticas conjuntas con proveedores y clientes. Este enfoque colaborativo, al construir relaciones sólidas y transparentes, permite un ujo ininterrumpido de bienes, materiales e información a lo largo de toda la cadena de suministro [3]; no obstante, la asignación desequilibrada de intereses entre las partes participantes podría resultar en el fracaso de las prácticas de la cadena de suministro, generando conflictos, negativa a cooperar y/o exceso de inventario [32]. Dentro de las estrategias identi cadas que favorecen la integración externa, se tiene el establecimiento de relaciones de cooperación a largo plazo con socios estratégicos [32], [33]; esta colaboración permite no solo formular objetivos estratégicos en común y compartir el riesgo de mercado, sino también trabajar conjuntamente para descubrir y resolver problemas logísticos [34]. Otra práctica común para el logro de la integración externa es facilitar el intercambio de información vital [22] de inventario y pronósticos de ventas[32], a través del establecimiento de mecanismos de comunicación efectivos que permitan gestionar dicha información [29], [30], [31].

Extender el concepto de integración para incluir la gestión de riesgos refuerza aún más la capacidad competitiva de la organización [30], [31]. Los enfoques holísticos de gestión de riesgos a lo largo de las cadenas de suministro, facilitados por un sistema logístico integral, se asocian positivamente con la resiliencia operativa [9], [23]. En un entorno empresarial cada vez más volátil, la capacidad de detectar, mitigar y responder rápidamente a las interrupciones se convierte en un elemento diferenciador que distingue a las empresas más robustas y adaptables [35].

Esta perspectiva integradora fomenta el aprendizaje organizacional y el desarrollo de capacidades generadoras de valor que son difíciles de imitar [19]. Un sistema logístico alineado estratégicamente con sus socios y que gestiona sus relaciones a través de un enfoque exible de integración de mercado, se convierte en una fuente constante de innovación y mejora [18]; es importante resaltar además, que este enfoque integrador no se limita al sector manufacturero, su impacto es igualmente signi cativo en la industria de servicios, donde estos sistemas ofrecen una oferta de valor superior [31].

La visión holística del rendimiento logístico requiere la consideración de múltiples perspectivas, que sugieran el uso de enfoques de toma de decisiones multicriterio para evaluar el rendimiento, lo que explícitamente reconoce la necesidad de considerar métricas diversas [24], [25]. Esto evoca a un cambio de paradigma que prioriza tanto los datos nancieros (el ROI y el ROA) como los no nancieros [25], [26]. Dentro de la información no nanciera que forma parte de los elementos citados en la literatura [18] para realizar la medición del rendimiento se encuentra la exibilidad o capacidad de adaptación a los requisitos del cliente y a los cambios del mercado [26]; por otro lado, la innovación que implica la rapidez en la introducción de nuevos productos; la con abilidad para el cumplimiento de plazos y e ciencia en el procesamiento de pedidos y en el servicio al cliente cuanti cando el nivel de atención y satisfacción.

En esta investigación se identificaron varios marcos de medición del rendimiento en una cadena de suministro. Uno de ellos es el cuadro de mando integral, que mide el rendimiento nanciero y no nanciero; equilibra el rendimiento interno y externo y vincula las métricas de rendimiento con los procesos [21]; sin embargo, el desafío para su implementación radica en mantener un enfoque objetivo debido a la inherente subjetividad en la de nición de objetivos, selección de indicadores y establecimiento de metas. Otro marco es el modelo de Referencia de Operación de la Cadena de Suministro (SCOR); basado en cinco procesos estándar de la cadena de suministro (plani cación, abastecimiento, fabricación, entrega y devolución), se desarrolló una terminología y un marco de métricas estándar de rendimiento de procesos. El modelo SCOR describe las cadenas de suministro en cinco dimensiones: con abilidad, capacidad de respuesta, exibilidad, costo y e ciencia en la utilización de activos [21]. Adicionalmente se identi ca un tercer marco que distingue entre medidas de inventario, medidas de proceso y medidas nancieras [21]. Muchas empresas con operaciones logísticas globales además utilizan el fondo de maniobra como indicador clave de su rendimiento, ya que el ujo de caja se acelera con el tiempo, lo que representa el resultado más evidente de la velocidad del ujo nanciero de una empresa [27].

El avance y la implementación de las tecnologías de la información como el Internet de las Cosas (IoT), el Big Data y la inteligencia arti cial, en las cadenas de suministros no solo agiliza las operaciones [21], [28], sino que también fomenta la resiliencia facilitando el desarrollo de modelos informáticos que permiten una administración estratégica de todo el sistema logístico [9]. La Industria 4.0 se presenta como una herramienta altamente relevante y e ciente para integrar datos en los sistemas logísticos proporcionando intercambio de información, aprovechando las tecnologías de la información avanzadas que facilitan la colaboración [20].

Incorporar la Industria 4.0 con los sistemas de tecnología de la información existentes impacta positivamente el rendimiento logístico [24] al proporcionar exibilidad, colaboración, accesibilidad, visibilidad [28] y disponibilidad oportuna de datos, así como una mejor toma de decisiones [20]. Además, la Industria 4.0 es un factor importante en el sistema ya que su implementación en la organización ayuda a construir relaciones sólidas y facilita la colaboración entre las diversas partes interesadas y socios comerciales (internos, proveedores y clientes), al permitir la comunicación en tiempo real [20], [28]. Esta evolución conceptual y organizacional marca un cambio signi cativo, donde la integración se convierte en una ventaja diferenciadora en un entorno globalizado y complejo.

3.3. LIMITACIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

A pesar del consenso general en la literatura sobre la relevancia de la Integración de la cadena de suministro y los Sistemas Logísticos Integrales, la investigación empírica y conceptual presenta brechas signi cativas que limitan la robustez y la generalización de sus hallazgos. Estas deficiencias se mani estan, en primer lugar, en la medición y análisis, donde la literatura a menudo depende de la evaluación subjetiva de los gerentes para cuanti car los niveles de competitividad, donde además enfrenta la restricción de tamaños muestrales insu cientes para emplear técnicas estadísticas robustas. En segundo lugar, la validez externa se ve comprometida, ya que los hallazgos se restringen frecuentemente a contextos sectoriales y geográficos muy especí cos.

Por último, a nivel conceptual, la ausencia de un marco uni cado en la literatura se evidencia en modelos que son parciales y selectivos, dejando áreas importantes con una insu ciente cobertura académica. A pesar de sus contribuciones, esta revisión sistemática se limita a la literatura publicada y de libre acceso, estando por tanto condicionada por la disponibilidad y calidad de estas.

Para futuras líneas de investigación, se sugiere abordar la dispersión teórica a través del desarrollo de un marco conceptual uni cado para los Sistemas Logísticos Integrales; explorar el desarrollo de modelos empíricos que cuanti quen el impacto especí co de tecnologías 4.0 en el rendimiento de los SLI en diferentes sectores, así como investigar la adaptación y los desafíos de los SLI en cadenas de suministro de economías emergentes o contextos especí cos de América Latina.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación nos permiten concluir que la integración logística, es fundamental para la construcción de una ventaja competitiva sostenible en las cadenas de suministros. Las organizaciones que logran alinear sus procesos logísticos con los de sus socios estratégicos demuestran una capacidad superior para responder a las dinámicas del mercado, optimizar la asignación de recursos y, en última instancia, diferenciarse de sus competidores.

Existe evidencia de que la implementación de sistemas logísticos integrales está directamente relacionada con una mejora signi cativa en el desempeño de la cadena de suministro, al potenciar la visibilidad, la e ciencia operativa y la exibilidad. Los sistemas de medición de rendimiento multifacéticos que trascienden las métricas nancieras, incluyendo dimensiones operacionales, de servicio al cliente y de sostenibilidad, son de gran importancia ya que permiten evaluar la efectividad integral de este nuevo enfoque de gestión. Aun cuando se identi caron diversos marcos de medición, es necesario que futuras investigaciones se centren en la de nición de indicadores objetivos, dada la in uencia de la subjetividad sobre los resultados, en algunos de los métodos actualmente utilizados.

Los hallazgos permitieron reconocer, además la in uencia transformadora de la Industria 4.0 como agente

catalizador del impulso para la implementación de este nuevo enfoque; las tecnologías de la información favorecen niveles de automatización, conectividad y análisis de datos que antes eran inalcanzables, promoviendo la toma de decisiones en tiempo real y la optimización de procesos a lo largo de toda la red logística.

Este estudio aporta valor teórico al consolidar la comprensión de los sistemas logísticos integrales no solo como una función operativa, sino como un paradigma de gestión estratégica que fomenta la resiliencia y la agilidad empresarial. Desde una perspectiva práctica, se enfatiza a los gerentes y tomadores de decisiones la necesidad de invertir en la digitalización y en la cultura de colaboración interorganizacional para capitalizar plenamente los beneficios de la integración logística avanzada.

REFERENCIAS

[1] M. A. L. Manrique Nugent, J. Teves Quispe, A. M. Taco Llave, y J. A. Flores Morales, «Gestión de cadena de suministro: una mirada desde la perspectiva teórica», *Revista Venezolana de Gerencia*, vol. 24, n.º 88, pp. 1136-1146, 2019.

[2] M. T. Alshurideh, N. M. Alsharari, y B. Al Kurdi, «Supply Chain Integration and Customer Relationship Management in the Airline Logistics», *Theoretical Economics Letters*, vol. 9, n.º 2, feb. 2019, doi: 10.4236/tel.2019.92028.

[3] C. Ataseven y A. Nair, «Assessment of supply chain integration and performance relationships: A meta-analytic investigation of the literature», *International Journal of Production Economics*, vol. 185, pp. 252-265, mar. 2017, https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.01.007.

[4] A. Khanuja y R. K. Jain, «Supply chain integration: a review of enablers, dimensions and performance», *Benchmarking: An International Journal*, vol. 27, n.º 1, pp. 264-301, dic. 2019, https://doi.org/10.1108/BIJ-07-2018-0217.

[5] Z. Xu, A. Elomri, L. Kerbache, y A. El Omri, «Impacts of COVID-19 on Global Supply Chains: Facts and Perspectives», *IEEE Engineering Management Review*, vol. 48, n.º 3, pp. 153-166, ago. 2020, doi: 10.1109/EMR.2020.3018420.

[6] B. L. MacCarthy, C. Blome, J. Olhager, J. Singh Srai, y X. Zhao, «Supply chain evolution – theory, concepts and science», *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 36, n.º 12, pp. 1696-1718, dic. 2016, https://doi.org/10.1108/IJOPM-02-2016-0080.

[7] G. C. Stevens y M. Johnson, «Integrating the Supply Chain … 25 years on», *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 46, n.º 1, pp. 19-42, feb. 2016, https://doi.org/10.1108/IJPDLM-07-2015-0175.

[8] Z. J. H. Tarigan, H. Siagian, y F. Jie, «Impact of Internal Integration, Supply Chain Partnership, Supply Chain Agility, and Supply Chain Resilience on Sustainable Advantage», *Sustainability*, vol. 13, n.º 10, p. 5460, may 2021, https://doi.org/10.3390/su13105460.

[9] H. Bautista Santos, J. L. Martínez Flores, G. Fernández Lambert, M. B. Bernabé Loranca, F. Sánchez Galván, y N. Sablón Cossío, «Integration model of collaborative supply chain», *DYNA*, vol. 82, n.º 193, pp. 145-154, sep. 2015, https://doi.org/10.15446/dyna.v82n193.47370.

[10] H. A. Long, D. P. French, y J. M. Brooks, «Optimising the value of the critical appraisal skills programme (CASP) tool for quality appraisal in qualitative-evidence synthesis», *Research Methods in Medicine & Health Sciences*, vol. 1, n.º 1, pp. 31-42, ago. 2020, https://doi.org/10.1177/2632084320947559.

[11] H. Ding, «History, Issues, and Future Scope of Logistics and Supply Chain», *JEBI*, vol. 3, n.º 2, pp. 95-105, abr. 2023, https://doi.org/10.53759/5181/JEBI202303010.

[12] A. Bujak, «The Development of the Concept of Supply Chain Management as an Example of the Evolution of Logistics», *WSB University in Wroclaw Research Journal*, vol. 15, n.º 1, pp. 133-151, ene. 2015.

[13] S. Min, Z. G. Zacharia, y C. D. Smith, «Defining Supply Chain Management: In the Past, Present, and Future», *Journal of Business Logistics*, vol. 40, n.º 1, pp. 44-55, mar. 2019, https://doi.org/10.1111/jbl.12201.

[14] R. Kain y A. Verma, «Logistics Management in Supply Chain – An Overview», *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, n.º 2, pp. 3811-3816, 2018, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.634.

[15] A. Flochet Mendez, «Revisión bibliográfica de la aplicación del modelo SCOR en gestión de cadenas de suministro de diferentes sectores industriales», *Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales*, 2021, [En línea]. Disponible en: https://uvadoc.uva.es/handle/10324/52193

[16] P. Trivellas, G. Malindretos, y P. Reklitis, «Implications of Green Logistics Management on Sustainable Business and Supply Chain Performance: Evidence from a Survey in the Greek Agri-Food Sector», *Sustainability*, vol. 12, n.º 24, p. 10515, dic. 2020, https://doi.org/10.3390/su122410515.

[17] M. B. Osei, T. Papadopoulos, A. Acquaye, y T. Stamati, «Improving sustainable supply chain performance through organisational culture: A competing values framework approach», *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 29, n.º 2, p. 100821, mar. 2023, https://doi.org/10.1016/j.pursup.2023.100821.

[18] T. M. Mofokeng y R. Chinomona, «Supply chain partnership, supply chain collaboration and supply chain integration as the antecedents of supply chain performance», *South African Journal of Business Management*, vol. 50, n.º 1, p. 10, feb. 2019, https://doi.org/10.4102/sajbm.v50i1.193.

[19] J. Saragih, A. Tarigan, E. F. Silalahi, J. Wardati, y I. Pratama, «Supply Chain Operational Capability and Supply Chain Operational Performance: Does

the Supply Chain Management and Supply Chain Integration Matters? », *International Journal of Supply Chain Management*, vol. 9, n.º 4, agosto de 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/344426743_Supply_Chain_Operational_Capability_and_Supply_Chain_Operational_Performance_Does_the_Supply_Chain_Management_and_Supply_Chain_Integration_Matters

[20] S. Tiwari, «Supply chain integration and Industry 4.0: a systematic literature review», *Benchmarking: An International Journal*, vol. 28, n.º 3, pp. 990-1030, mar. 2021, https://doi.org/10.1108/BIJ-08-2020-0428.

[21] V. S. Ülgen y H. Forslund, «Logistics performance management in textiles supply chains: best-practice and barriers», *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 64, n.º 1, pp. 52-75, ene. 2015, https://doi.org/10.1108/IJPPM-01-2013-0019.

[22] S. Srivastava y R. K. Singh, «Exploring integrated supply chain performance in healthcare: a service provider perspective», *Benchmarking: An International Journal*, vol. 28, n.º 1, pp. 106-130, sep. 2020, https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2020-0125.

[23] X. Shen, Q. Xu, Q. Liu, y M. Leibercht, « e relationship between supply chain resilience, supply chain integration, and supply chain performance: A MASEM analysis - Xin Shen, Qianhui Xu, Qiao Liu, Markus Leibercht, 2023», *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology*, vol. 45, n.º 2, pp. 3361-3377, abr. 2023, https://doi.org/10.3233/JIFS-220649.

[24] K. L. Lee, N. A. N. Azmi, J. R. Hanaysha, H. M. Alzoubi, y M. T. Alshurideh, « e e ect of digital supply chain on organizational performance: An empirical study in Malaysia manufacturing industry», *Uncertain Supply Chain Management*, vol. 10, n.º 2, pp. 495-510, 2022, https://doi.org/10.5267/j.uscm.2021.12.002.

[25] K. Moons, G. Waeyenbergh, y L. Pintelon, «Measuring the logistics performance of internal hospital supply chains – A literature study», *Omega*, vol. 82, n.º C, pp. 205-217, ene. 2019, https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.01.007.

[26] F. Saleheen, Md. M. Habid, y Z. Hafani, «Supply Chain Performance Measurement Model: A Literature Review», *International Journal of Supply Chain Management*, vol. 7, n.º 3, junio de 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/355983003_Supply_Chain_Performance_Measurement_Model_A_Literature_Review

[27] R. Hand eld y T. Linton, *Flow: How the Best Supply Chains rive* , University of Toronto Press. Toronto, Canadá, 2022. [En línea]. Disponible en: https://dokumen.pub/flow-how-the-best-supply-chains-thrive-9781487538002.html

[28] H. Fatorachian y H. Kazemi, «Impact of Industry 4.0 on supply chain performance», *Production Planning & Control*, vol. 32, n.º 1, pp. 63-81, ene. 2020, https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1712487.

[29] O. Sinaga, S. Riantani, Y. Hendayana, M. H. Mohd Saudi, y Z. Zainudin, «Impact of Supply Chain Integration on Competitive Advantage», *International Journal of Supply Chain Management*, vol. 8, n.º 2, pp. 86-94, abr. 2019, https://doi.org/10.59160/ijscm.v8i2.2979.

[30] R. Hendijani y R. Saeidi Saei, «Supply chain integration, competitive strategies and rm performance», *International Journal of Organizational Analysis*, vol. 33, n.º 6, pp. 1410-1438, jul. 2024, https://doi.org/10.1108/IJOA-06-2023-3788.

[31] A. Al-Kamel, G. Al-Masbhi, y J. Chen, « e E ect of Supply Chain Integration on Achieving Competitive Advantage in Service Industry», *Open Journal of Social Sciences*, vol. 9, n.º 9, pp. 510-525, sep. 2021, doi: 10.4236/jss.2021.99037.

[32] T. H. Nguyen Ti, «Wal-Mart's successfully integrated supply chain and the necessity of establishing the Triple-A supply chain in the 21st century», *Journal of Economics and Management*, vol. 29, n.º 3, pp. 102-117, 2017, doi: 10.22367/jem.2017.29.06.

[33] V. P. K. Sundram, V. Chandran, y M. A. Bhatti, «Supply chain practices and performance: the indirect e ects of supply chain integration», *Benchmarking: An International Journal*, vol. 23, n.º 6, pp. 1445-1471, ago. 2016, https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2015-0023.

[34] G. P. Pisano, «Toward a prescriptive theory of dynamic capabilities: connecting strategic choice, learning, and competition», *Ind Corp Change*, vol. 26, n.º 5, pp. 747-762, oct. 2017, https://doi.org/10.1093/icc/dtx026.

[35] Z. Cao, B. Huo, Y. Li, y X. Zhao, « e impact of organizational culture on supply chain integration: a contingency and con guration approach», *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 20, n.º 1, pp. 24-41, ene. 2015, https://doi.org/10.1108/SCM-11-2013-0426.

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

INGENIO
2026, VOL 9(1), ENERO - JUNIO, PP. 107-116

REVISTA INGENIO

"UpGrid: Integración flexible de generación distribuida en redes de baja y media tensión mediante sistemas de control avanzados (Portugal)"

"UpGrid: Flexible Integration of Distributed Generation in Low- and Medium Voltage Networks through Advanced Control Systems (Portugal)"

Puente Bosquez Samantha Marlene | Universidad Técnica Estatal de Quevedo-UTEQ, Quevedo (Ecuador)
Albarracín Cristian Samuel | Universidad Técnica Estatal de Quevedo-UTEQ, Quevedo (Ecuador)
Pisco Vanegas Juan Carlos | Universidad Técnica Estatal de Quevedo-UTEQ, Quevedo (Ecuador)
Fuentes Véliz Josue Lenin | Instituto Tecnológico Superior Ciudad de Valencia-ISTCV, Los Ríos (Ecuador)

Recibido: 18/9/2025
Recibido tras revisión: 29/9/2025
Aceptado: 19/10/2025
Publicado: 28/1/2026

PALABRAS CLAVE
Upgrid, Inovgrid, Inovcity, tecnología de redes, generación distribuida, Redes inteligentes.

RESUMEN
Las redes eléctricas de baja tensión (BT) todavía se manejan con métodos tradicionales, lo que limita la visibilidad de los flujos de potencia y tensión, así como el entendimiento de la conectividad y la automatización de las operaciones. En este contexto, el proyecto UPGRID presenta una propuesta abierta y completa que busca modernizar la distribución eléctrica, generando beneficios operativos y nuevas oportunidades de negocio para todos los actores del sector, incluidos los consumidores finales. Su meta es dotar al sistema eléctrico de productos y servicios innovadores que optimicen la gestión de la red, reduzcan los tiempos de restauración del suministro y ofrezcan información precisa en tiempo real, facilitando además la participación activa en el mercado energético. Basado en la iniciativa InovGrid, el proyecto se estructura en tres pilares: medición inteligente, redes inteligentes enfocadas en la eficiencia y la confiabilidad, y microgeneración, incorporando tecnologías existentes para fortalecer la monitorización, el control y la seguridad.

KEY WORDS
UpGrid, InovGrid, InovCity, Grid Technologies, Distributed Generation, Smart Grid.

ABSTRACT
Low-voltage (LV) electrical networks are still being managed with traditional methods, which really limits how well we can see power and voltage flows, understand network connectivity, and automate operations. In this light, the UPGRID project steps in with a bold and comprehensive plan to modernize electrical distribution. This initiative aims to create operational benefits and open up new business opportunities for everyone involved in the sector, including end consumers. The project's mission is to equip the electrical system with cutting-edge products and services that enhance network management, shorten supply restoration times, and deliver precise real-time information, all while encouraging active participation in the energy market. Building on the InovGrid initiative, UPGRID is built around three key pillars: smart metering, intelligent networks that prioritize efficiency and reliability, and microgeneration, all designed to leverage existing technologies for better monitoring, control, and security.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes eléctricas de baja tensión (BT) continúan aplicando técnicas tradicionales en Portugal, al igual que en gran parte de Europa, donde estas técnicas presentan una limitada visibilidad de los flujos de potencia y tensión, el insuficiente conocimiento de la conectividad real de los consumidores. Esta visión disminuye la eficiencia y la confiabilidad de la distribución eléctrica, dificultando la búsqueda de fallos, el control de pérdidas técnicas y no técnicas, así como la reacción ante eventos de la red. En el caso de Portugal, la topología dispersa de las redes rurales y la antigüedad de parte de la infraestructura han incrementado los costes de mantenimiento y limitado la integración de la generación distribuida [1].

El objetivo del proyecto precisamente a modo de respuesta a dichas limitaciones, funcionando, de este modo, como una mejora abierta, estandarizada e integral de las redes de BT, generando beneficios operativos y nuevas

https://doi.org/10.29166/ingenio.v9i1.8782
2025 Universidad Central del Ecuador
CC BY-NC 4.0 —Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional
pISSN 2588-0829
eISSN 2697-3243
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

oportunidades de negocio para todos los actores implicados. Consiste en dotar al sistema eléctrico de productos y servicios innovadores que optimicen la gestión y operación de las redes de distribución, promoviendo una mayor eficiencia, confiabilidad y flexibilidad. Dentro de los beneficios esperados se encuentran la reducción de los tiempos de restauración del suministro, la precisión de la información en tiempo real, la participación activa del consumidor en los mercados energéticos y la integración de nuevas fuentes renovables [1].

A pesar de ello, la aplicación de estas soluciones se encuentra con retos técnicos y retos regulatorios importantes. Por el lado técnico, destacan la interoperabilidad entre plataformas de diversos fabricantes, la comunicación bidireccional segura, la ciberprotección de los datos energéticos. Por el lado regulatorio, Portugal debe enfrentarse al reto de modificar el marco normativo para habilitar la participación por parte de los prosumidores, la definición de las tarifas dinámicas y la garantía de la neutralidad tecnológica; todos estos retos son consistentes con la política de la Unión Europea siguiendo la dirección de la transición energética digitalizada, descentralizada y sostenible [2].

Desde esta aproximación, el proyecto InovGrid, da lugar al modelo portugués para la red inteligente y fundamenta su enfoque en tres pilares base. La medición inteligente, el primero de ellos, pone en marcha el sistema de gestión automatizada de medidores (AMM), que genera datos en tiempo real y permite la detección de pérdidas, el control de la demanda y la mejora de la calidad del suministro. El segundo pilar, Smart Grids, intenta generar mayor eficiencia y fiabilidad del sistema a través de algoritmos de control, automatización de subestaciones y digitalización de la operación de campo. Por último, microgeneración busca promover la conexión de pequeñas unidades de generación, fundamentalmente fotovoltaicas residenciales, que contribuyen a la reducción de emisiones y a la participación activa de los consumidores en el mercado eléctrico [2].

El proyecto UPGRID articula estas tres dimensiones a través de la propia escuela de soluciones basadas en la explotación de soluciones tecnológicas de las que se dispone en el horizonte. Estas soluciones son: sistemas avanzados de gestión de la red, herramientas móviles para el personal de las instalaciones, control sobre la infraestructura de la medición PRIME, dispositivos de red inteligente, plataformas de monitorización y gestión de la energía en hogares. Estas soluciones aumentan la analítica, el control, la monitorización y la visualización en la red, ofreciendo, gracias a esto, una operación más resiliente y más transparente de aquella. Sin embargo, el proyecto UPGRID solo será un éxito si se superan suficientemente los retos tanto técnicos como reglamentarios que se han planteado a lo largo del papel, consolidándose como un modelo replicable en otros países europeos y haciendo de Portugal un referente al respecto en la modernización de redes de baja tensión [1], [2].

2. METODOLOGÍA

La presente metodología es el resultado de integrar los componentes experimentales, técnicos y de simulación que se han trabajado en la demostración portuguesa realizada en el marco del proyecto UPGRID, integrado en la infraestructura nacional Smart Grid InovGrid, dirigido por EDP Distribuição en la ciudad de Lisboa. Esta área de estudio comprende cerca de 14 000 clientes, 2 subestaciones primarias, más de 200 subestaciones secundarias y 16 estaciones de carga para vehículos eléctricos, lo que podría considerarse un escenario urbano propicio para estudiar soluciones de gestión inteligente de la red [3], [4].

El trabajo se corresponde con una investigación aplicada, con carácter experimental y demostrativo orientada a estudiar la integración de tecnologías avanzadas en las redes de distribución de baja y media tensión, con el objetivo de generar conocimiento práctico en relación a la implementación de redes inteligentes (Smart Grids) y sistemas de gestión de energía, evaluando aspectos técnicos, operativos y socioeconómicos en el proceso de obtención de sinergias con el diseño de redes para su correcta implementación de soluciones Smart [3], [4].

Fig. 1.

Ubicada en Parque das Naçoes, Lisboa [4].

2.1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se adoptó un enfoque mixto:

Cuantitativo, para la medición de las variables eléctricas (voltaje, potencia, flujos de carga, pérdidas y desempeño de los dispositivos AMI y HEMS). Cualitativo, para analizar la participación del consumidor, la aceptación tecnológica y el cambio de comportamiento frente a tarifas dinámicas y estrategias de gestión energética [5].

En la implementación se emplearon tecnologías clave como: AMI (Advanced Metering Infrastructure), para la monitorización y control del consumo en tiempo real y llevar un seguimiento de la demanda, HEMS (Home Energy Management System), que optimiza el uso energético doméstico y propicia la respuesta a tarifas dinámicas, DTC (Distribution Transformer Controller), utilizado para la supervisión y control de transformadores de distribución que proporcionan estabilidad al sistema, plataforma de gestión centralizada, que integra la información de los dispositivos, permite el procesamiento de

indicadores clave de desempeño (KPIs) y facilitar el análisis de eventos anómalos en la red [6].

Para asegurar la ciberseguridad del sistema, se registraron protocolos de encriptación, protocolos de autenticación y protocolos de detección de intrusos en aquellas comunicaciones entre los módulos AMI, HEMS y DTC como fórmulas para oponer a las comunicaciones entre los módulos AMI, HEMS y DTC a la ciberseguridad, aumentando así la determinación operativa y la protección de los datos, del sistema en general, en entornos ciberconectados. Para desgranar la replicabilidad de las soluciones experimentadas en Lisboa en cuanto a soluciones aplicables a otros contextos, ya sea en zonas rurales, en ciudades de gran escala o en regiones de escasa infraestructura, se cumplieron los requisitos requeridos, tanto los técnicos como los de comunicación, para adaptarse a la misma. Esta demostración de replicabilidad sirvió para aportar ideas sobre escalabilidad y flexibilidad tecnológica [7].

Finalmente, para complementar la demostración práctica, se realizaron simulaciones mediante software especializado, como DIgSILENT PowerFactory, a fin de modelar el comportamiento del sistema eléctrico bajo distintos escenarios de carga, generación distribuida y respuesta a la demanda. Estas simulaciones posibilitaron la evaluación comparativa del desempeño del sistema con y sin la implementación de las soluciones inteligentes, reforzando la validez técnica y científica del estudio [4], [8], [9].

Fig. 2.

Conformación del Proyecto Upgrid.

2.2. TECNOLOGÍAS IMPLEMENTADAS

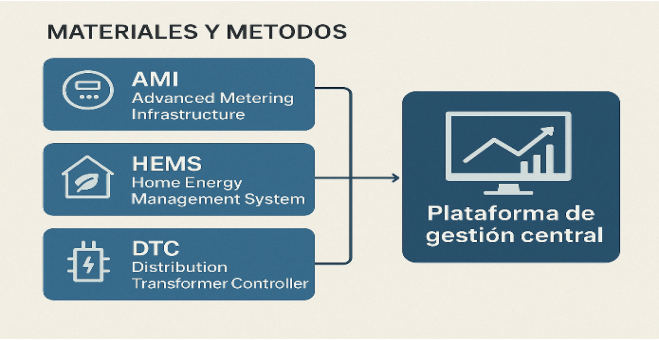
La infraestructura de medición avanzada (AMI): es un sistema bidireccional que tiene como objetivo la comunicación entre la red que opera en un sistema eléctrico determinado y los medidores es decir que permitiría que los medidores inteligentes le proporcionen información sobre variables eléctricas y otros registros, ampliando su funcionalidad para que se puedan gestionar el estado del consumo, la calidad de la energía, la gestión de carga para vehículos eléctricos (EV) e incluso registrar y detectar fallos. La infraestructura de medición avanzada (AMI, por sus siglas en inglés) realizaría para el sistema propuesto un trabajo importante mejorando notablemente la confiabilidad del sistema, y permitiendo que el sistema eléctrico se apoyase en la información para la toma de decisiones, de esa manera dirigido el uso, la planificación y la operación del sistema eléctrico, y maximizando la eficiencia de la operación del sistema eléctrico [10].

Sistemas de gestión de la energía en el hogar (HEMS): Sistemas que permitirían mantener la infraestructura AMI o la Smart Grids que permite a los consumidores gestionar el consumo de la energía en sus hogares haciendo uso de algoritmos con los que se maximiza la eficiencia de la energía, permitiendo el control del consumo denominado (conexiones o dispositivos) y la gestión de la microgeneración. Los HEMS permiten implicar a los consumidores para el aprovechamiento de tarifas variables del operador del sistema eléctrico [11], [12].

Gestión de la demanda (DSM): Estrategias que permite la gestión de la demanda eléctrica que tienen como objetivo ajustar la posibilidad de consumo de los usuarios (consumidores) a las señales de precios (señales económicas) o de la red (señales de la infraestructura) y que permitiría fomentar la eficiencia de la energía, la reducción de los picos de demanda y la posibilidad de reducción del coste del consumo eléctrico. La DSM permite hacer uso de la información generada para tomar decisiones y de la gestión automatizada de la carga [9].

Fig. 3.

Tecnologías implementadas



2.2.1. Identificación de la arquitectura y tecnologías

La arquitectura que se presenta a continuación en la demostración portuguesa de UPGRID se basa en el subsistema de información de la infraestructura de InovGrid dada por la infraestructu0ra de la EDP Distribuição existente en ese momento. La arquitectura del Proyecto InovGrid dado por

la EDP Distribuição se puede dividir en tres partes (ya que se considera el Gobierno de los datos) [1].

- Infraestructura de medición (red BT)
- Subestaciones secundarias (MV-LV)
- Sistemas centrales

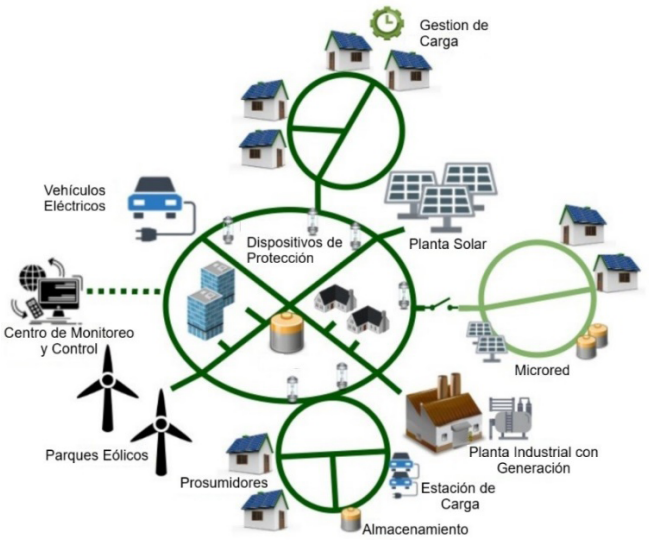
La infraestructura de medición, le brinda un conjunto de funcionalidades (tanto técnicas como comerciales) que comprenden medición del consumo, curvas de carga, control de la potencia conectada, eventos y alarmas. Todas estas funcionalidades son accesibles a los clientes de forma remota a través de la tecnología PLC PRIME o GPRS. En la subestación secundaria se ubicó el DTC (Controlador del Transformador de Distribución) que opera en dos niveles [13], [14].

- Adición de datos (proporcionando acceso y recopilación de datos de las cajas EDP).
- Monitorización de la subestación secundaria (midiendo las medidas eléctricas de la subestación sec., Eventos, alarmas y automatización).

En la tercera parte de la arquitectura de InovGrid se implementan sistemas centrales para permitir la integración de la infraestructura InovGrid y de sus funcionalidades en los procesos de negocio: gestión técnica de la red de distribución, AMI y la incorporación de esta infraestructura en los distintos sistemas corporativos y técnicos de la empresa [15].

Fig. 4.

Arquitectura del proyecto



La arquitectura cuenta con:

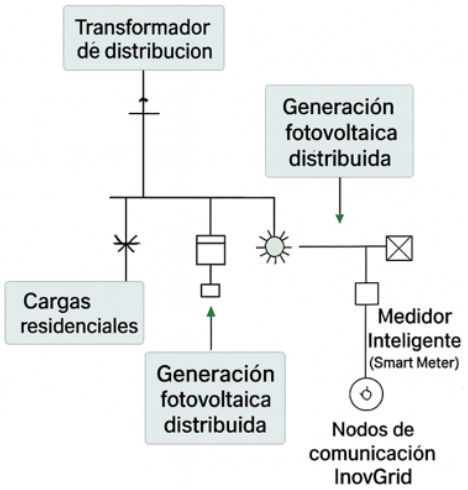
a) Gestión de Carga
b) Vehículos Eléctricos
c) Dispositivos de Protección
d) Planta Solar
e) Microred
f) Centro de Monitoreo y Control
g) Parques Eólicos
h) Prosumidores
i) Almacenamiento
j) Planta Industrial con Generación
k) Estación de Carga

2.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA RED

- 2 subestaciones / 144 SS
- 12.618 consumidores residenciales (BT)
- 17 estaciones de carga de EV Red de BT en su mayor parte Zona urbana subterránea

Fig. 5.

Características de la red



El principal reto que enfrenta la demo de la UPGRID portuguesa es aglutinar todas las funcionalidades (con miras a monitorear/operar la red de BT), utilizando no solo la infraestructura de DSO, tratándose en este caso de la Infraestructura InovGrid, sino que se hace necesario involucrar a otros agentes en esa tarea. Para cumplir el objetivo propuesto, se definió una arquitectura integrada bajo los tres pilares que figuran en [12], [15].

- DSO - Operadores de Sistemas de Distribución (Distribution System Operators)
- Mercados Minoristas (Market Hub)

Los principales impulsores de InovGrid son la sostenibilidad, la calidad del suministro eléctrico, así como la seguridad y fiabilidad de las redes de distribución eléctrica; Empowerment del Cliente; Generación Descentralizada (ver anexo, fig 6).

Utilizando información real del caso piloto de la implementación de varios medidores inteligentes / redes

inteligentes, se podrá empezar a construir el marco que orientará el cambio cultural y mental con base en el comportamiento de los clientes y en la ocupación de la temática del consumo energético [12].

Caja de energía o Energy Box (fig. 7) es un sistema de gestión de energía, instalado en la instalación eléctrica del usuario, y dentro del concepto de Smart Grids es el nodo de red del propio usuario abarcando las funciones de Load Controller y microgeneration controller. Más que equipos de medición inteligentes, proporciona información técnica para una mejor gestión de la red y se encuentra diseñado para ser la puerta de enlace del usuario para servicios de valor añadido, con el objetivo de la gestión de la casa, la implementación de procesos de sostenibilidad y el uso inteligente de la energía [16].

DTC- Controlador de transformador de distribución: El DTC constituye, tal y como su propio nombre indica, el cerebro de la red inteligente. Equipamiento instalado en el armario de transformación MT / BT (1 DTC por transformador de potencia) centraliza, realiza la comunicación entre todas las Cajas de Energía y los Sistemas de información y considerado para tal fin (ver anexo, fig 8). A la vez que proporciona el control y monitorización de forma remota de distintos equipos, sensores en los gabinetes de transformación tales como: aparamenta, monitoreo de carga de unidades transformadoras MT / BT, temperatura del gabinete de control, iluminación pública, etc [4], [16].

2.2.3. Caso de uso

La iniciativa denominada Upgrid incluirá experiencias en Portugal, cuyo fin será realizar una validación experimental de esquemas de tarificación de red dinámica en clientes residenciales; para ello, se ha desarrollado una metodología que incluye cuatro pasos de análisis [4].

La primera fase la constituye el análisis del consumo a muy alta resolución temporal, a partir de datos obtenidos de los medidores inteligentes (SM) utilizados para la identificación de las franjas horarias más altas, así como de las situaciones de congestión de red. Tras ello, en una segunda fase, se procederá a la evaluación y comparación de los casos bajo estudio, como el de una tarifa por tiempo de uso (Time-of-Use, ToU) y una tarifa de precio pico crítico (Critical Peak Pricing, CPP), de tal forma que se determine cuál de estas produce un mayor efecto sobre la demanda, el cual será el que minimiza situaciones de pico de consumo y el que favorece el cambio de carga (load shifting) [4], [17].

En una tercera etapa, se llevará a cabo la calibración de precios dentro del esquema que se ha elegido. Esta calibración se realizará con el principio de neutralidad de la recuperación de ingresos para el Distribuidor de Sistema (DSO), de manera que los ingresos que se obtienen con la nueva tarifa dinámica son los mismos ingresos que obtendría el esquema tarifario convencional de referencia. Por tanto, únicamente los ahorros del cliente final están relacionados con el cambio de los patrones de consumo (desplazamiento de carga y reducción de la demanda máxima) [18].

En la cuarta etapa se sigue el proceso de cuantificación de los resultados a partir de un conjunto de Indicadores Claves de Rendimiento (KPI). Se han definido unos KPI que permiten medir el impacto de las tarifas dinámicas a partir de tres parámetros: su eficacia en la contención de los consumos en horas punta, el nivel de planicidad de la curva de demanda y el bienestar del consumidor [19].

Adicionalmente, un subconjunto de clientes formará parte del programa de gestión activa de la demanda (Demand-Side Management, DSM), que consiste en incitar a los usuarios activos a gestionar la demanda mediante la implementación de Sistemas de Gestión de Energía para el Hogar (Home Energy Management Systems, HEMS). Estos clientes activos habilitan al DSO para realizar técnicas de control directo de las cargas específicas para situaciones de congestión de red crítica. También debemos recalcar que la implementación de las técnicas de experimentación está sujetas a la obtención del consentimiento informado de los clientes que participan y a la colaboración de sus respectivos comercializadores de electricidad (retailers) [14].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESULTADOS DEL PROYECTO UPGRID

El proyecto UPGRID ha posibilitado realizar progresos notables en el monitoreo, control y gestión de las redes de baja tensión (BT), logrando mejoras palpables para los operadores de red y los consumidores finales. La demostración en Lisboa, situada sobre la infraestructura InovGrid, ha sido un contexto real para validar tecnologías inteligentes como, por ejemplo, AMI (Advanced Metering Infrastructure), HEMS (Home Energy Management Systems) y DTC (Data Transformer Controllers), obteniendo resultados medibles sobre la eficiencia operativa, la calidad de suministro y la participación de los usuarios.

Se implementó un modelo de red denso y explícito que permitía observar con exactitud y fiabilidad la infraestructura y facilitaba la simulación y planificación de la red en un porcentaje elevado de la confianza, que redujo en aproximadamente 15 % la tasa de errores en la estimación de la topología y un 20 % el tiempo de planificación de las intervenciones respecto al método tradicional. La utilización de herramientas inteligentes de supervisión y despacho en baja tensión permitió reducir hasta en un 25 % los tiempos de respuesta ante la aparición de fallos y un 18 % el tiempo medio de restauración del servicio (SAIDI), además de una reducción del 12 % de las pérdidas técnicas por un mejor equilibrio de la carga y la detección anticipada de anomalías en transformadores y ramales secundarios [2], [10].

La introducción de sistemas AMI y HEMS permitió una monitorización del consumo energético en tiempo real, contribuyendo a alcanzar una reducción del 22 % en la frecuencia media de interrupciones (SAIFI) y aumentando la estabilidad de tensión en el punto de suministro. Los consumidores con HEMS lograron un ahorro energético entre el 8 % y el 14 %, equivalentes a entre 65 y 95 USD de ahorro por hogar al año, gracias a horarios de uso, control de cargas y respuesta a la demanda.

En lo que respecta al análisis de los hogares implicados se refieren establece beneficios económicos directos, especialmente en los sectores vulnerables, baja factura eléctrica y opciones de participación en el autoconsumo y generación distribuida. El hogar generador de electricidad puede llegar a ahorrar una media anual de 65 a 92 USD siguiendo el perfil de consumo y grado de automatización del sistema doméstico. A nivel agregado, tal y como se estima casi en 14,000 clientes, la estimación de ahorro anual total supera los 900,000 USD, lo que representa una clara importancia y claridad económica para la comunidad.

Considerando la abrumadora recolección de datos en tiempo real que el sistema AMI y los HEMS llevan a cabo, se utilizaron protocolos de cifrado de extremo a extremo (AES-256), autenticación por medio de certificados digitales y directrices de anonimización del tipo recogidas en el reglamento europeo de la protección de datos (GDPR). Las pruebas de seguridad informática llevaron a una mesura del 3% de cualquier nivel de vulnerabilidad residual, haciendo facto la veracidad del sistema frente a ciberataques e intentos de acceso no autorizado.

El proyecto UPGRID muestra que la digitalización de las redes de baja tensión utilizando tecnologías interoperativas y escalables puede mejorar la calidad del suministro, reducir las pérdidas y desarrollar la confianza del consumidor. Los resultados refuerzan la viabilidad tanto técnica, como de coste de un modelo de red de distribución abierta, estandarizada y orientada hacia el usuario, en la línea de los objetivos europeos relacionados con la transición energética y la sostenibilidad [14].

3.2. DISCUSIÓN

La deliberación relativa al proyecto UPGRID trata precisamente de los avances y contratiempos que conlleva la modernización de las redes de baja tensión a partir de tecnologías inteligentes. Los datos cuantitativos indicaron que la adopción de sistemas como por ejemplo AMI (Advanced Metering Infrastructure o Infraestructura de Medición Avanzada) o HEMS (Home Energy Management System o Sistema de Gestión de la Energía en el Hogar) permiten una gestión mucho más eficiente y flexible del consumo eléctrico, que se concretó en una reducción media del 11 % de las pérdidas técnicas y una reducción del 9,5 % de los picos de demanda (peak demand). Estos beneficios se vieron reflejados también en la reducción del 18 % de la duración media de las interrupciones (SAIDI) y del 22 % de la frecuencia de interrupciones (SAIFI), en un avance global en la calidad del servicio.

La aplicación de esquemas tarifarios dinámicos propició una alteración del comportamiento del consumidor, desplazando las cargas eléctricas hacia potencias más exigidas. Los consumidores residenciales alcanzaron ahorros energéticos entre el 8 % y el 14 %, lo que equivale entre 65 y 95 USD/año por vivienda, mientras que los clientes industriales consiguieron disminuir su demanda máxima de energía eléctrica en un 7 %, optimizando de este modo la utilización de la infraestructura y reduciendo las penalizaciones por potencia contratada. En los sectores vulnerables, los programas de eficiencia y de seguimiento permitieron realizar ahorros medios del 12 % y mejorar la continuidad del suministro en lugares con alta densidad de usuarios.

El despliegue piloto llevado a cabo en Lisboa, que se realizó con cerca de 14,000 consumidores, generó unos beneficios anuales estimados en 450,000 USD, con un payback (tiempo de retorno de la inversión) de aproximadamente 5 años teniendo en cuenta los ahorros por reducción de pérdidas, mantenimiento, y mejoras en la calidad de suministro. En cuanto a la comparación con los proyectos europeos: el Grid4EU llegó a establecer en términos de reducciones de pérdidas entre el 8 % y el 12 %, al tiempo que las pérdidas en continuidad de servicio aumentaban hasta un 15 %, cifras comparables o incluso inferiores a las de UPGRID; no obstante, el enfoque portugués introdujo una capa adicional de gestión activa en baja tensión y un mayor grado de integración a los consumidores domésticos, dejando, por tanto, una mayor granularidad en la respuesta de la demanda y una reducción de los picos de consumo en los momentos adecuados.

Por otro lado, la integración de los recursos energéticos distribuidos (DER) y el manejo activo de la demanda supusieron un paso adelante en la transición energética, siguiendo las metas de sostenibilidad y eficiencia energética marcadas por toda la Unión Europea. No obstante, existen barreras relevantes relacionadas con la madurez tecnológica, la interoperabilidad de los sistemas, los costes de la implementación y la protección de la información en la medición de avanzada. La integración de algunos estándares de ciberseguridad como AES-256 y la anonimización de acuerdo con el GDPR fue eficaz, mostrando una tasa de vulnerabilidad menor al 3 %, pero hay que reforzar los protocolos de autenticación y de acceso remoto.

El trabajo defiende en ese sentido que la exitosa adopción requiere esfuerzos de emergencia y coordinados entre operadores, reguladores, consumidores e industria, así como políticas que fomenten la estandarización, la confianza digital, la igualdad en el acceso tecnológico. UPGRID pone de manifiesto que las smart grids constituyen una solución técnica y económicamente válida para la modernización de la distribución eléctrica, aunque subsisten factores clave –en especial en normativa y protección de datos– que deben ser resueltos si se desea potenciar su impacto y su aceptación social.

3.3. NORMATIVA Y BARRERAS

3.3.1. Recomendación de la de la Comisión Europea

La Recomendación de la Comisión Europea del 9 de marzo de 2012 establece las directrices con el fin de que los Estados miembros lleven a cabo la preparación para la implantación de los sistemas de contadores inteligentes, promoviendo a su vez que la decisión se pueda basar en un análisis de costes y beneficios, y fijando como objetivo que al menos el 80 % de los consumidores puedan contar con los contadores para el año 2020. Adicionalmente, pone de relieve la necesidad de garantizar la interoperabilidad, la seguridad de la información, la protección de datos, la posibilidad del acceso gratuito a la información de consumo y que los usuarios puedan optimizar la eficiencia energética, con un marco de seguimiento y coordinación entre los Estados miembros y la Comisión Europea [19].

- La regulación europea
- Comunicación de la Comisión UE 2011
- Directiva de eficiencia energética 2012

Existiendo un escenario a futuro, si tenemos en cuenta esta comunicación que plantea la Comisión Europea los beneficios de acelerar la construcción y la implementación de las smart grids, el desarrollo de la infraestructura eléctrica para la integración de grandes volúmenes de energía renovable, la mejora en la eficiencia energética, la creación de un sistema eléctrico en el que los consumidores tengan una mayor participación activa, un sistema eléctrico más flexible y más fiable, etc. En este sentido también se habla de la elaboración de normas comunes, de asegurar que los equipos sean interoperables y de proteger la privacidad, pero también de la cooperación que debe existir entre los Estados miembros, las autoridades reguladoras y el sector privado, etc., para poder dar el salto del desarrollo de la innovación a la obtención de una gran implantación en la Unión Europea [19], [20].

En la que se desarrollaron temas como:

- Mejora de modelos europeos de “smart grids”.
- Temas de seguridad y de privacidad de datos de los usuarios.
- Incentivos regulatorios para el proceso de “smart grids”
- Las Smart grid en un mercado minorista competitivo a favor del usuario final.
- Apoyo continuo para la innovación y su rápida aplicación.

El mandato M/490 de la Comisión Europea, emitido en el año 2011, solicita a los organismos de normalización europeos (CEN, CENELEC y ETSI) la elaboración de un “Marco de trabajo” en el ámbito de las Smart Grids / Smart Metering para facilitar la armonización, interoperabilidad y evolución de los estándares. Solicita que definan una arquitectura de referencia técnica sobre flujos funcionales de datos entre dominios del sistema energético, determinando interfaces comunes y protocolos de comunicación compatibles con el objetivo de que medidores inteligentes y otros componentes interconecten independientemente del proveedor. Pero también el mandato busca garantizar que este marco sea suficientemente flexible para adaptarse a las distintas tecnologías existentes y emergentes, y que evolucione a lo largo del tiempo, mientras mantiene la coherencia transversal en los estándares y promueve la convergencia entre los Estados miembros [20].

El diseño de las tarifas de acceso a la red y de los sistemas de incentivos deben ser diseñados para que sean un reflejo de los costes reales de la distribución y transporte de la energía, de forma que no se ponga en riesgo el uso de las redes inteligentes, el almacenamiento de energía y la generación distribuida, los mecanismos tarifarios deben ser favorecedores de unas inversiones eficientes en redes inteligentes y con el objetivo de asegurar que los consumidores, así como los productores (incluyendo los prosumidores con renovables) puedan participar activamente en las decisiones del mercado sin verse limitadas por cargos injustificados [20].

3.3.2. Barreras para la Implementación

La introducción a gran escala de las innovaciones desarrolladas en el marco del proyecto UPGRIT se enfrenta a ciertas barreras significativas que deben superarse si se quiere garantizar la adopción generalizada y el éxito de estas innovaciones. Estas barreras pueden clasificarse en cuestiones tecnológicas, de regulación y de mercado.

En el aspecto tecnológico, el ser una tecnología todavía no madura se presenta como el principal tipo de barrera que hay que tener en cuenta. Esta inmadurez tecnológica incrementa la inseguridad y el riesgo de una inversión inicial, mientras que la escasez de las pruebas a escala, que dificultan la realización de pruebas robustas y hacen que las estimaciones de costes y beneficios sean poco fiables para el propio europeo de la tecnología.

En el ámbito político-regulatorio la descoordinación y desajuste son evidentes y claramente presentes. No existe una estrategia de la unión europea en términos de redes inteligentes, además de la falta de conciencia de los reguladores nacionales sobre el papel de las Smart Grids para lograr los objetivos europeos en la materia como la integración de energías renovables y de mejora de la eficiencia energética. Y es más, es necesaria también una necesidad de definir marcos regulatorios que contengan incentivos claros para la inversión por parte de la industria como la definición de nuevas estructuras tarifarias que den señales de precio eficaces para la gestión de la demanda (DSM) [19].

Por otro lado, en el ámbito económico y de mercado, existe una gran barrera de la incertidumbre para

cuantificar el valor de las soluciones. Es necesario hacer ACB estandarizados y exhaustivos en relación a las prestaciones específicas de las Smart Grids. También se requieren más proyectos guía o proyectos demostradores a gran escala que sean analizados y que validen los potenciales beneficios operativos y económicos y que, por lo tanto, sirvan como base para el diseño de políticas futuras y recomendaciones de mercado que den lugar a la adopción masiva de las innovaciones.

3.4. ANÁLISIS FODA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS DE REDES INTELIGENTES

El presente análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) condensa aquellos factores que destacan por su papel relevante en el desarrollo y en la adopción de soluciones de smart grid como las desarrolladas en el proyecto UpGrid, en el sector eléctrico europeo:

Fortalezas

La fortaleza principal consiste en la elaboración de infraestructuras de smart grid que suponen la base física de una distribución moderna; una infraestructura que se compone de la conjunción de sistemas de medición en tiempo real (AMI) y sistemas de gestión de la energía en el hogar (HEMS), equivalente a una suma de los cuales emerge no sólo la capacidad de monitorización granular de las demandas sino la capacidad de actuar de forma automática sobre la demanda. Una consecuencia directa de esta arquitectura es la reducción del rango de pérdidas técnicas y no técnicas de la red, lo que hace que la eficiencia general del sistema aumente [11], [18].

Debilidades

El proyecto presenta en el aspecto interno debilidades formativas y económicas. Por una parte, carece de la investigación y de la formación específica que cubra todos los temas multidisciplinarios necesarios para el estudio, el diseño y la operación de dichas redes complejas. Por la otra, la elevada carga financiera de la financiación y de la puesta en operación inicial pueden suponer un obstáculo económico clave que frene su implementación masiva y asuste a potenciales financiadores, poniendo en peligro la viabilidad económica de un proyecto a largo plazo, en ausencia de mecanismos de apoyo.

Oportunidades

El panorama actual constituye una valiosa oportunidad estratégica. La tecnología específicamente diseñada permitirá ofrecer unas capacidades de monitorización y control de la red de baja tensión (BT) muy superiores a las que existen hoy, es un nivel de red que tradicionalmente resulta opaco para los operadores. De este modo se puede acudir a una mayor integración del compromiso del cliente final en el mercado eléctrico, dándole información y control sobre su consumo. Asimismo, también se puede a facilitar la aplicación integrada de nuevas tecnologías (ej. IoT, IA) y, fundamentalmente, el aprovechamiento e integración de las energías renovables distribuidas [12], [15], [16].

Amenazas

El entorno externo muestra muchas amenazas en lo que respecta a las cuestiones legales y de seguridad. La privacidad y la confidencialidad de los datos de los consumidores que AMI y HEMS reúnen, es una de las preocupaciones más relevantes, y puede fomentar la desconfianza social y el litigio si estas no quedan abordadas con procedimientos adecuados. Por otro lado, el marco regulatorio europeo se presenta como un mapa un tanto fragmentado, en gran parte no alineado; en algunas ocasiones, incluso establece restricciones técnicas obsoletas y, en otras, escasos incentivos económicos que permitan invertir en una tecnología tan costosa. La ausencia de una única estrategia europea concertada en materia de redes inteligentes aumenta la incertidumbre y supone un freno a la inversión coordinada [4].

4. CONCLUSIONES

La arquitectura técnica y funcional diseñada afianza el rol central del Operador del Sistema de Distribución (DSO) en el ecosistema eléctrico del futuro. Dicha arquitectura permite al DSO llevar a cabo una interacción fluida y, por tanto, en tiempo real, con los diferentes agentes de mercado y consumidores finales. Al utilizar el conocimiento pormenorizado del comportamiento de los usuarios de la red, el DSO es capaz de gestionar datos en línea y activar la flexibilidad de la demanda cuando sea necesario, optimizando la operación de la red.

El éxito técnico y social de las soluciones aplicadas. Se alcanzó una mejora cuantitativa en las O&M de la BT y una mejora en la calidad de servicio percibida por los usuarios. Los estudios socioeconómicos en las regiones piloto demuestran la efectividad de la aplicación de nuevas tecnologías e integración de renovables, además de proporcionar también un análisis exhaustivo de los costos de financiación e implementación que sirve como guía para los mayores despliegues.

El proyecto logró satisfactoriamente su objetivo de adaptar las capacidades para la gestión inteligente de la red en un ámbito de interconexión. Se verificó que la eficiencia energética, junto a la integración efectiva de fuentes renovables pueden ser considerados aspectos clave de la transición energética. La sinergia operativa que puede existir entre la infraestructura de medición avanzada AMI y los sistemas de gestión de la energía en el hogar HEMS es ejemplarizable y escalable en un contexto en particular, cimentando las bases técnicas para un futuro desarrollo energético a escala global.

4.1. RECOMENDACIONES

Fortalecer la base de datos de seguimiento de la red para poder tener la seguridad de medir la reducción de picos de demanda, pérdidas técnicas evitadas, mejora de índices de continuidad del servicio (SAIDI y SAIFI). La consideración de métricas comparables entre distintos sectores de la red servirá para poder demostrar de forma más convincente la eficiencia alcanzada con la implementación de tecnologías AMI, HEMS y DTC, y facilitará poder replicar el modelo en otros medios eléctricos europeos.

Dado el gran volumen de datos que producen los sistemas inteligentes, es crucial establecer protocolos de comunicación estandarizados, plataformas que puedan trabajar juntas y mecanismos de protección que utilicen cifrado avanzado y autenticación segura. También es recomendable realizar auditorías de ciberseguridad de manera regular y aplicar políticas de anonimización de datos de acuerdo con el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR), asegurando así la integridad del sistema y la confianza del consumidor.

Para evaluar la escalabilidad y sostenibilidad del sistema, sería ideal replicar el modelo que se desarrolló en Lisboa en áreas rurales o semiurbanas que tengan características topológicas y perfiles de consumo distintos. Esto nos permitiría observar cómo se comporta ante cambios en la demanda, diferentes niveles de generación distribuida y diversas condiciones socioeconómicas, lo que ayudaría a establecer un marco de aplicación más amplio para las futuras redes inteligentes.

Es fundamental involucrar a los usuarios de manera activa en la gestión energética. Esto se puede lograr a través de programas educativos y de concienciación sobre la eficiencia eléctrica, así como implementando tarifas dinámicas que fomenten el desplazamiento de cargas y un uso más consciente de la energía. La aceptación y colaboración de los consumidores son esenciales para asegurar la sostenibilidad social y tecnológica del modelo UPGRID.

BIBLIOGRAFÍA

[1] P. Cunha, S. Almeida Neves, A. Cardoso Marques, y Z. Serrasqueiro, «Adoption of energy efficiency measures in the buildings of micro-, small- and medium-sized Portuguese enterprises», *Energy Policy*, vol. 146, p. 111776, nov. 2020, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111776.

[2] J. Crispim, J. Braz, R. Castro, y J. Esteves, «Smart Grids in the EU with smart regulation: Experiences from the UK, Italy and Portugal», *Utilities Policy*, vol. 31, pp. 85-93, dic. 2014, https://doi.org/10.1016/j.jup.2014.09.006.

[3] L. E. Rielli y I. Campos, «The process matters: Exploring public participation in solar energy projects in Brazil and Portugal», *Energy Research & Social Science*, vol. 125, p. 104078, jul. 2025, https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104078.

[4] C. Gouveia, D. Rua, F. J. Soares, C. Moreira, P. G. Matos, y J. A. Peças Lopes, «Development and implementation of Portuguese smart distribution system», *Electric Power Systems Research*, vol. 120, pp. 150-162, mar. 2015, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.06.004.

[5] R. Pereira, J. Figueiredo, R. Melicio, V. Mendes, J. Martins, y J. C. Quadrado, «Consumer energy management system with integration of smart meters», *Energy Reports*, vol. 1, pp. 22-29, nov. 2015, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2014.10.001.

[6] I. L. R. Gomes, M. G. Ruano, y A. E. Ruano, «MILP-based model predictive control for home energy management systems: A real case study in Algarve, Portugal», *Energy and Buildings*, vol. 281, p. 112774, feb. 2023, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112774.

[7] Y. Chawla, A. Kowalska-Pyzalska, y P. Duarte Silveira, «Marketing and communications channels for diffusion of electricity smart meters in Portugal», *Telematics and Informatics*, vol. 50, p. 101385, jul. 2020, https://doi.org/10.1016/j.tele.2020.101385.

[8] F. W. Geels, S. Sareen, A. Hook, y B. K. Sovacool, «Navigating implementation dilemmas in technology-forcing policies: A comparative analysis of accelerated smart meter diffusion in the Netherlands, UK, Norway, and Portugal (2000-2019)», *Research Policy*, vol. 50, n.o 7, p. 104272, sep. 2021, https://doi.org/10.1016/j.respol.2021.104272.

[9] F. Iberraken, R. Medjoudj, y D. Aissani, «Decision Making on Smart Grids Projects Moving using AHP Method: The case of Algerian Network», *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, n.o 9, pp. 543-548, 2013, https://doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00524.

[10] M. A. R. Lopes, C. H. Antunes, K. B. Janda, P. Peixoto, y N. Martins, «The potential of energy behaviours in a smart(er) grid: Policy implications from a Portuguese exploratory study», *Energy Policy*, vol. 90, pp. 233-245, mar. 2016, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.12.014.

[11] M. Shakeri *et al.*, «Implementation of a novel home energy management system (HEMS) architecture with solar photovoltaic system as supplementary source», *Renewable Energy*, vol. 125, pp. 108-120, sep. 2018, https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.114.

[12] J. B. Santos, R. Scharnigg, J. Monteiro, y A. Pacheco, «Fair shares or smart savings? Exploring business models, justice and efficiency trade-offs in Portuguese energy communities», *Energy Research & Social Science*, vol. 125, p. 104102, jul. 2025, https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104102.

[13] F. Alassery, «Advanced metering infrastructure smart metering based on cloud architecture for low voltage distribution networks in application of smart grid monitoring», *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 35, p. 100747, sep. 2022, https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100747.

[14] R. Qi, Q. Li, Z. Luo, J. Zheng, y S. Shao, «Deep semi-supervised electricity theft detection in AMI for sustainable and secure smart grids», *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 36, p. 101219, dic. 2023, https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101219.

[15] P. D. Halle y S. Shiyamala, «Secure advance metering infrastructure protocol for smart grid power system enabled by the Internet of Things», *Microprocessors and Microsystems*, vol. 95, p. 104708, nov. 2022, https://doi.org/10.1016/j.micpro.2022.104708.

[16] F. Ghanavati, G. J. Osório, J. C. O. Matias, y J. P. S. Catalão, «Transactive data-driven and consumer-centric home energy management system for local energy communities in Portugal», *Sustainable Cities and Society*, vol. 131, p. 106698, sep. 2025, https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106698.

[17] E. Efatinasab, N. Azadi, G. A. Susto, C. M. Ahmed, y M. Rampazzo, «Fortifying smart grid stability: Defending against adversarial attacks and measurement anomalies», *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 43, p. 101799, sep. 2025, https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101799.

[18] K. Gupta, V. Kumar, y R. Prakash, «An Efficient Approach to Key Management for Bidirectional Communication in AMI System of Smart Grids», *Procedia Computer Science*, vol. 259, pp. 1179-1188, 2025, https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.04.073.

[19] The European Parliament and the Council of the European Union, *Directiva (UE) 2019/944 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad y por la que se modifica la Directiva 2012/27/UE, vol. 158. 2019, pp. 125-199. [En línea]. Disponible en: http://data.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj/spa*

[20] European Commission, «Standardization Mandate to European Standardisation Organisations (ESOs) to support European Smart Grid deployment», CEN-CENELEC-ETSI, Brussels, mar. 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/AreasOfWork/CEN-CENELEC_Topics/Smart%20Grids%20and%20Meters/Smart%20Grids/m490_smart-grids_mandate.pdf?utm_source=chatgpt.com

Fig. 6.

Integración de la arquitectura al proyecto

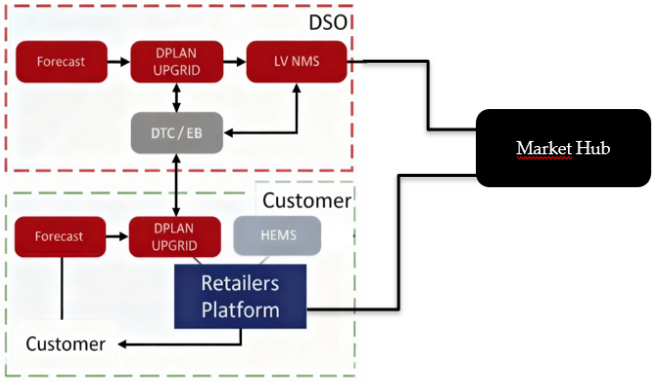


Fig. 7.

Energy Box

Fig. 8.

Controlador de transformador de distribución

EDITORIAL UNIVERSITARIA

Esta revista, usó tipografía Minion Pro tamaño 11, se terminó de diagramar en Editorial Universitaria en el mes de enero de 2026 siendo rector de la Universidad Central del Ecuador el Dr. Patricio Espinosa del Pozo, Ph. D. y Director de la Editorial Universitaria el MSc. Edison Benavides.