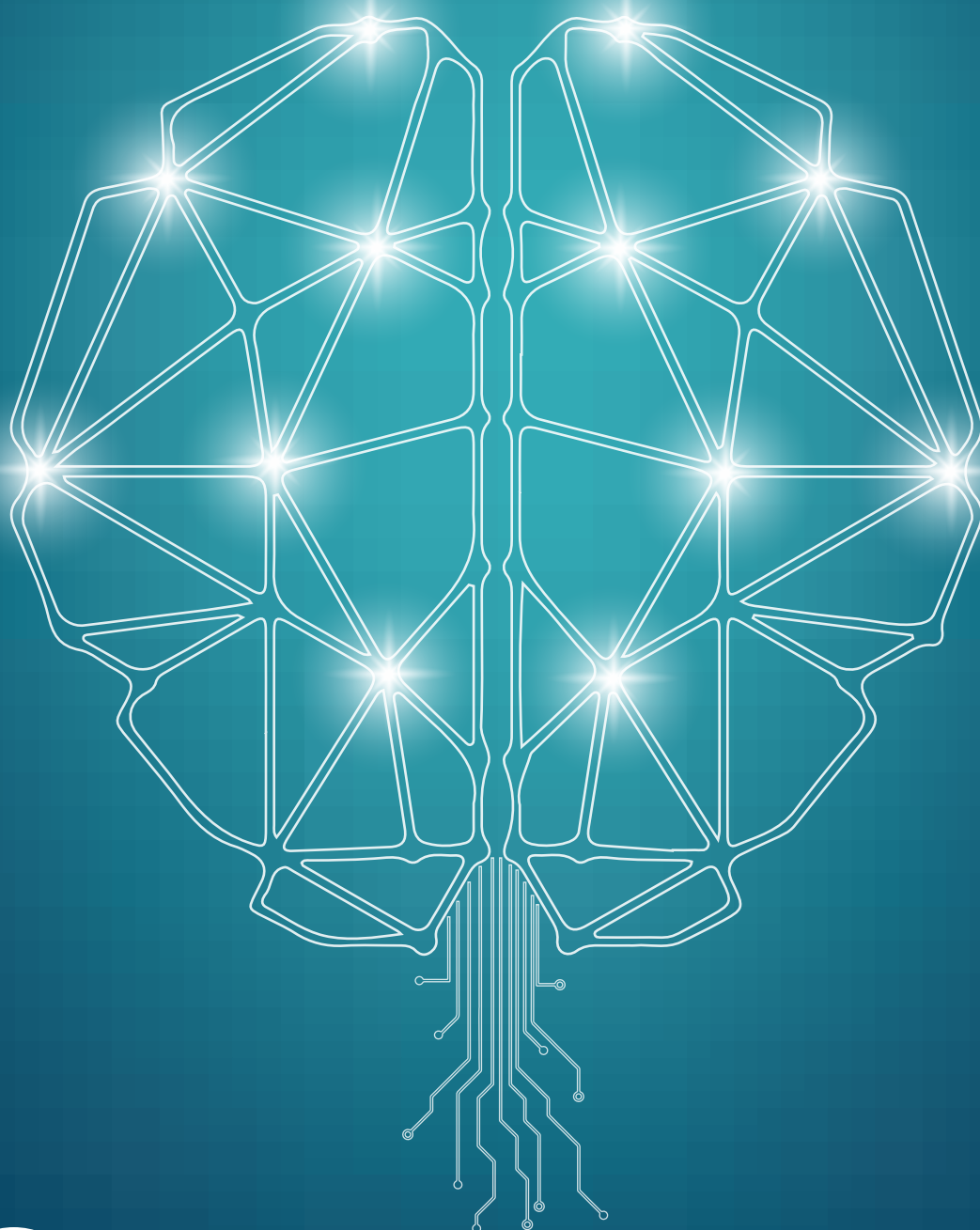


FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

INGENIO

VOL.9 N° 2, 2026 e-ISSN 2697-3243/ISSN 2588-0829



INGENIERÍA, 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. 2 | julio - diciembre 2026 | 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

Dr. Robert Enríquez Reyes, Ph.D., Editor en Jefe, Universidad Central del Ecuador, ECUADOR
Ing. Elizabeth Salazar Sigcho, MSc., Editor Académico, 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 Rodríguez, 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
Mgr. Alfonsina Rodríguez, Universidad Internacional SEK-UNISEK, ECUADOR

Este número estuvo bajo la coordinación editorial del
Dr. Robert Enríquez Reyes, Ing. Elizabeth Salazar, MSc.,
Mgs. Paulina Zary, Sr. Kevin Casco y Sr. Paúl Tutasi.

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

Diagramación | Sr. Kevin Casco
Sr. Paúl Tutasi
Portada | Carrera de Ingeniería en Diseño Industrial,
Universidad Central del Ecuador

Editorial Universitaria, 2026
Ciudadela Universitaria, av. América, s. n.
Quito, Ecuador
+593 (02) 254-202
fing.revista.ingenio@uce.edu.ec



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

Validación práctica de dispositivos biomédicos personalizados mediante impresión 3D de bajo costo.	4
--	---

Medina-Bustos G., Moya-Jiménez R.

Determinación de curvas de aforo experimentales para un canaleta Parshall de 6" a partir de la variación de la pendiente del fondo del canal.	9
---	---

Calderón-Vásquez D., Sandoval-Garzón R.

Variabilidad de la Producción de Energía Eléctrica en el Sistema Nacional Interconectado del Ecuador según Tipo de Tecnología Generadora	16
---	----

Salmon-Barzola B.

ESTUDIO DE CASO

Evaluación patológica del puente concordia (Bolivia) mediante ensayos no destructivos; inviabilidad técnica y recomendación de demolición	23
--	----

Salvatierra-Quiroga S., Gorena-Espada G., Ríos-Gonzales R., Claros-Román J.

REVISIÓN SISTEMÁTICA

Análisis de la Madurez y Falencias de Ciberseguridad en el Sector Inmobiliario y de la Construcción ante la Transformación Digital	34
---	----

Jácome-Zabala M., Mayorga-Jácome T.

De la Construcción 4.0 a la Construcción 5.0: Marco de transición hacia una innovación sostenible en Ecuador	40
---	----

Goyes-Balladares A., Moya-Jiménez R., Peñafiel-Valla G.



REVISTA INGENIO

Practical Validation of Personalized Biomedical Devices Using Low-Cost 3D Printing

Validación práctica de dispositivos biomédicos personalizados mediante impresión 3D de bajo costo.

Gabriela Medina Bustos | Universidad Técnica de Ambato, UTA Facultad de Diseño y Arquitectura (Ambato-Ecuador)

Roberto Moya Jiménez | Universidad Técnica de Ambato, (Ambato-Ecuador)

Recepción: 31/10/2025
Recepción tras revisión: 29/06/2026
Aceptado: 15/07/2026
Publicado: 31/07/2026

PALABRAS CLAVE

Realidad aumentada;
impresión 3D; dispositivos
biomédicos personalizados;
diseño y validación industrial;
innovación tecnológica.

KEY WORDS

Augmented reality; 3D printing;
Personalized biomedical devices;
Industrial Design and Validation;
Technological innovation

RESUMEN

Este estudio aborda la aplicación de la realidad aumentada (RA) como herramienta complementaria en el diseño y la validación de dispositivos biomédicos personalizados mediante impresión 3D, destacando su papel en los procesos de innovación tecnológica en biomedicina. La investigación analiza la interacción entre lo digital y lo físico para comprender cómo la superposición de modelos tridimensionales sobre el entorno clínico contribuye a una validación anatómica más precisa y a una mejor toma de decisiones durante el desarrollo de dispositivos. La integración de la RA en este contexto permite observar, ajustar y validar los modelos antes de su fabricación, optimizando el flujo de trabajo y fomentando la colaboración interdisciplinaria entre profesionales del diseño, la ingeniería y la medicina. Además, se examinan los factores técnicos, humanos y organizativos que condicionan su implementación, como la interoperabilidad del hardware y el software, la curva de aprendizaje y los costes de adopción. Finalmente, reflexiona sobre el potencial de esta herramienta para transformar los procesos tradicionales de diseño biomédico, promoviendo un enfoque más eficiente, participativo y centrado en el paciente, que consolida la realidad aumentada y la impresión 3D como pilares en la transición hacia tratamientos personalizados e interactivos.

ABSTRACT

It addresses the application of augmented reality (AR) as a complementary tool in the design and validation of personalized biomedical devices using 3D printing, highlighting its role within the processes of technological innovation in biomedicine. The research analyzes the interaction between the digital and the physical to understand how the overlay of three-dimensional models on top of the clinical environment contributes to more accurate anatomical validation and better decision-making during device development. The integration of AR in this context makes it possible to observe, adjust and validate models before they are manufactured, optimizing the workflow and fostering interdisciplinary collaboration between design, engineering and medical professionals. In addition, the technical, human and organizational factors that condition its implementation are examined, such as hardware and software interoperability, the learning curve and adoption costs. Finally, it reflects on the potential of this tool to transform traditional biomedical design processes, promoting a more efficient, participatory and patient-centered approach, which consolidates augmented reality and 3D printing as pillars in the transition to personalized and interactive treatments.

1. INTRODUCTION

The development of immersive and digital fabrication technologies has significantly transformed contemporary biomedical practice, driving new methods of diagnosis, simulation, and computer-aided design [1]. Among these innovations, augmented reality (AR) has emerged as a key tool for integrating digital environments with physical spaces, facilitating anatomical understanding and direct interaction with three-dimensional models during clinical and design processes [2].

In a complementary way, 3D printing has enabled the production of personalized biomodels and patient-specific medical devices, contributing to the development of precision medicine and user-centric approaches [3],[4]. The convergence of both technologies poses an interdisciplinary scenario where engineering, industrial design and medical sciences converge to improve the effectiveness of validation, ergonomics and clinical communication processes [5],[6].

This article addresses the use of an augmented reality tool applied

to the design and validation of personalized biomedical devices using 3D printing, based on a documentary review of recent research. The objective is to analyze its application, principles and relevance in current biomedical processes, highlighting the technological and human factors that condition its adoption. This review seeks to

offer a comprehensive vision of the opportunities and challenges that accompany the incorporation of these technologies in contemporary clinical practice, contributing to strengthening the link between technological innovation and health [7],[9],[12].

2. STATE OF THE ART AND CONTEXT

2.1. AUGMENTED REALITY IN THE HEALTHCARE SECTOR

In the context of biomedical design, augmented reality (AR) has been positioned as an essential tool to optimize the creation and validation of personalized devices; by allowing the superimposition of three-dimensional information on the clinical environment or on physical models generated by 3D printing. This interaction between the digital and the tangible makes it possible to simulate, adjust and accurately evaluate the geometry and behavior of implants, prostheses or surgical guides before their final manufacture. The principle of integrating AR into the biomedical design process seeks to reduce positioning errors, reduce times, improve interdisciplinary communication, and facilitate early validation of patient-centered customized solutions [1].

2.2. APPLICATION CASES

Several studies have demonstrated the submillimeter precision achieved with this technology; in cranio-orbit facial reconstruction procedures assisted by Microsoft HoloLens 2, errors of less than 1mm were reported, and 1° which confirms the usefulness of AR to guide placement and alignment during surgical [2] planning. Similarly, validation experiments such as 3D printed phantoms showed navigation 1.71 times faster than that obtained with conventional methods, maintaining a margin of error within the clinically acceptable range. [3] Other work focused on neuronavigation based on printed 3D markers recorded average errors of 1.56 mm, demonstrating the compatibility between AR and 3D printing for intraoperative guidance [4].

In spinal interventions, the use of AR with 3D intraoperative imaging improved the accuracy of pedicle screw placement compared to traditional neuro-navigated techniques [5]. Beyond the surgical setting, AR has proven its effectiveness in medical education and clinical communication, enabling immersive anatomical visualization and spatial analysis of complex structures using mixed environments and physical biomodels [6].

2.3. IMPLEMENTATION REQUIREMENTS

The effective implementation of an augmented reality (AR) tool for the design and validation of personalized biomedical devices requires the balanced integration of technological, human and organizational components, which can be classified into four areas: hardware, software, training, human factors.

Hardware: The most successful configurations combine high-resolution optical viewers such as Microsoft HoloLens or HoloLens 2, along with devices capable of running real-time three-dimensional visualization. [2] Some workflows included printed 3D markers that acted as anatomical landmarks and allowed for accurate spatial recording of the digital model about the patient[4]. Other advanced settings. These devices must ensure minimal latency and submillimeter resolution to maintain the correct alignment between the virtual model and the physical environment, and compatibility between the viewer and the 3D modeling and printing stations is critical to avoid scaling or anatomical matching errors. [7], [8].

Software: The programs used must include segmentation, anatomical registration, surface modeling and direct export to 3D printing functions, in addition to allowing integration with rendering engines compatible with mixed reality, in addition, computer security and the management of sensitive data are necessary conditions to ensure compliance with ethical standards and clinical confidentiality. [1], [9] Some references mention the use of custom mobile applications that operate on Android or iOS systems to plan surgical trajectories and display anatomical overlays in real time [10].

Training: Various studies agree that the adoption of AR systems and 3D printing require structured training for medical personnel, designers and engineers, focused on the spatial interpretation of 3D models, manipulation of interfaces and calibration of equipment [1]. The learning curve may represent an initial barrier; but practical experience significantly improves the user's accuracy and confidence after the sessions; training programs interdisciplinary learning between students from different areas demonstrate that joint learning increases acceptance and innovation in the hospital environment [11].

Human Factor: Perception studies highlight that users positively value visual clarity, the ability to interact and the fluid integration with existing clinical protocols [1]. However, challenges are identified such as institutional resistance to new technologies, the need for broader clinical validation, and implementation costs, factors that still limit their massification in health centers [12].

3. METHODOLOGY

3.1. WORKFLOW USED

Anatomical capture: The process begins with obtaining the patient's medical data by means of computed tomography (CT) or magnetic resonance imaging (MRI), which will be converted into DICOM files for subsequent segmentation. This stage allows the extraction of the morphological information necessary for the precise anatomical reconstruction, an essential condition in the design [6].

3D processing and modeling: Medical images are processed with specialized software capable of segmenting anatomical structures and generating three-dimensional models in STL or OBJ format. During this phase, the cut points, contact edges and dimensional tolerances are defined, optimizing the geometry to ensure compatibility with 3D printing processes [10].

Visualization and adjustment with augmented reality: Once the digital models were obtained, they were integrated into the projec-

tion in the physical environment, devices such as Microsoft HoloLens 2 and tablets with 3D overlay software were used, which allow real-time evaluation of the fit of the model on the anatomical biomodel or on the corresponding body region [2].

3D printing of the biomedical component: Once the model has been digitally validated, the device or biomodel is 3D printed, compatible materials such as photopolymeric resins and medical or commercial PLA polymers are used, this is selected according to the application (surgical guides, prostheses, supports or reference markers) This stage allows the generation of physical models with proven dimensional accuracy ready for validation tests [3].

Experimental validation and precision measurement: The manufactured device is compared with the digital reference data to verify dimensional deviations and positioning accuracy. The results obtained previously report mean errors of 1.5 to 1.8 mm, remaining within the clinically acceptable range, in addition the implementation of AR allowed to reduce surgical time by 25-30%, equivalent to 45-90 min less per intervention [10].

3.2. UNIVERSITY EXPERIMENTAL CASE

As a practical validation of the workflow described, an experimental exercise was carried out within the Technical University of Ambato, in the Faculty of Design and Architecture, in which the stages of digital modeling, lamination, 3D printing and anatomical verification of a personalized biomedical device in the cervical region were applied.

This example allowed us to verify the technical feasibility of the proposed methodology, from digital planning to the physical validation of the prototype, evidencing the precision of fit and the ergonomics of the design generated.

During the process, PLA filament was used as the base material, configuring optimized printing parameters for organic geometries and low-density perforated structures, which facilitate ventilation and user comfort, the result was a functional printed model that was evaluated directly on the body surface, verifying the morphological adaptation of the design.

The following figures document the most relevant phases of this procedure.

Figure 1 shows the initial configuration of the three-dimensional model in the laminating software, where the 3D printing parameters were defined, such as layer height, fill percentage, model orientation, and structural support layout. This stage allowed for optimization of manufacturing and prevention of deformation during the printing process.

Fig. 1.

Configuration of the three-dimensional model in laminating software, showing the arrangement of supports and 3D printing parameters.

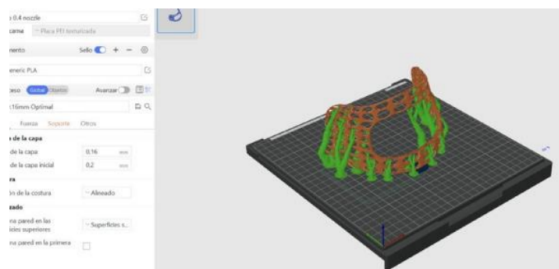


Figure 2 shows the complete simulation of the customized biomedical model with structural support, ready for physical printing. In this phase, the estimated manufacturing times, material consumption, and total volume of the model were validated. The prototype was planned to be manufactured in PLA thermoplastic material, selected for its rigidity, dimensional stability, and ease of printing, ideal for physical validation of the design.

Fig. 2.

Simulation of the customized biomedical model with structural support, ready for physical printing on PLA material.

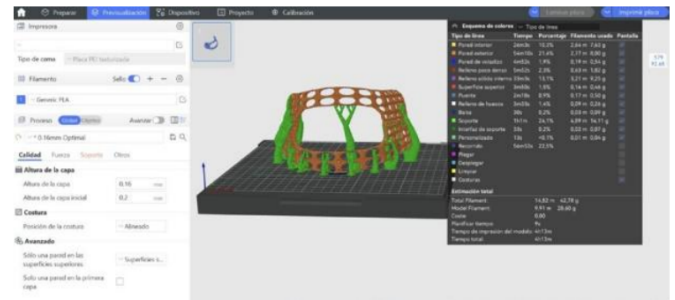


Figure 3 shows the physical model freshly printed in PLA, prior to the removal of the structural supports. This result allowed us to verify geometric fidelity with respect to the digital design and the correct execution of the printing process.

Fig. 3.

Physical model newly printed in PLA, prior to the removal of structural supports.



Subsequently, Figure 4 shows an overview of the biomedical device once the supports have been removed, highlighting its ergonomic geometry and structural flexibility. These characteristics are essential to ensure comfort and correct morphological adaptation in the user's cervical area.

Fig. 4.

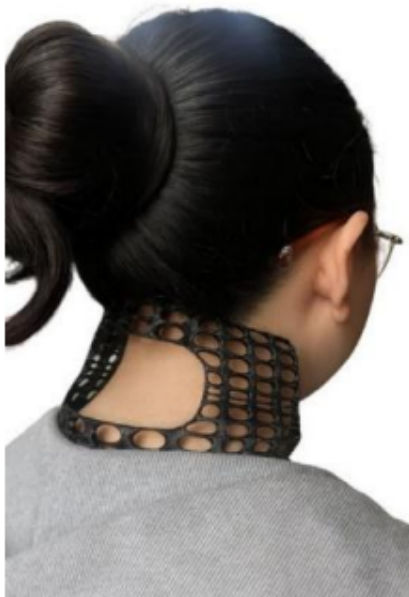
General view of the finished biomedical device, showing its ergonomic geometry.



Finally, Figure 5 shows the application of the model on the user, highlighting the accuracy of fitness, comfort, and ergonomics of the design. This result confirms the feasibility of the proposed methodological flow, from digital modeling to physical validation, demonstrating the potential of 3D printing and augmented reality in the development of customized biomedical devices.

Fig.5.

Application of the model on the user, evidencing the flexibility, ergonomics and precision of attachment in the cervical area.



4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. BENEFITS AND IMPACT

The integration of augmented reality (AR) and 3D printing in the design and validation of personalized biomedical devices has demonstrated direct benefits in the accuracy, visualization, and efficiency of clinical procedures. In terms of visualization, AR allowed anatomical structures to be observed with greater clarity and precision, achieving alignment errors of less than 1mm in craniocoronal reconstructions [2] and 1.56 mm in neuro-guided navigation using 3D printed markers [4].

In decision-making, personalized models accelerated surgical planning; in orthopedic oncology, a reduction in operative time of 25 to 30% was recorded, maintaining an average accuracy of 1.7 mm[10].

Remote collaboration was strengthened through the use of mixed environments with motion sensors (IMUs), which enabled simultaneous interaction between physicians, designers, and engineers during the planning and adjustment of surgical guides [7].

In terms of efficiency, trials with 3D printed phantoms showed that the increased navigation was 1.71 times faster than conventional methods, reducing costs and the need for additional prototypes [3].

4.2. CHALLENGES AND LIMITATIONS

Several studies point to the difficulty of linking AR systems with medical imaging equipment and 3D modeling stations, which can lead to scale mismatches or loss of spatial accuracy during data transfer. [8]. In addition, interoperability between platforms remains limited, forcing the use of hybrid configurations that require manual calibrations and constant validations [4].

In terms of cost, the acquisition of both specialized machinery, software, and biocompatible materials represents a considerable investment for hospitals, laboratories and for the user himself [9].

CONCLUSIONS

The integration of the Augmented Reality (AR) with the 3D printing represents a significant advance in the field of Design and validation of personalized biomedical devices, by allowing the digital environment to be linked to the physical environment through interactive anatomical models [1], [4], [5]. Its application makes it possible to visually and dimensionally verify devices before they are manufactured, improving the accuracy, interdisciplinary communication and efficiency of clinical and design processes [2], [3]. This technological convergence between industrial design and biomedical engineering constitutes methodological support for contemporary medical practice, by offering tools that integrate precision, ergonomics and adaptability in patient care [6], [10].

Beyond the technical benefits, the implementation of AR in biomedicine shows the need to strengthen the processes of training and technological adoption, considering human, economic, and organizational factors that condition its application [9], [11]. Overcoming limitations such as interoperability between systems, equipment costs and the learning curve will consolidate this tool as an essential part of the clinical flow and the development of medical products. Together, AR and 3D printing are emerging as strategic pillars of biomedical innovation, guiding the transition towards a more precise, participatory and patient-centred medicine [7], [9], [12].

REFERENCES

- [1] A. Taghian, M. Abo-Zahhad, M. S. Sayed, and A. H. Abd El-Malek, "Virtual and augmented reality in biomedical engineering", *Biomed Eng Online*, vol. 22, no. 1, pp. 1–25, Dec. 2023, doi: 10.1186/S12938-023-01138-3/FIGURES/12.
- [2] A. Pose-Díez-de-la-Lastra et al., "Microsoft HoloLens 2 vs. tablet-based augmented reality and 3D printing for fronto-orbital reconstruction of craniosynostosis: a case study", *3D Print Med*, vol. 11, no 1, Dec. 2025, doi: 10.1186/s41205-025-00251-4.
- [3] H. H. Glas, J. Kraeima, P. M. A. van Ooijen, F. K. L. Spijkervet, L. Yu, and M. J. H. Witjes, "Augmented Reality Visualization for Image-Guided Surgery: A Validation Study Using a Three-Dimensional Printed Phantom", *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 79, no 9, pp. 1943.e1-1943.e10, sep. 2021, doi: 10.1016/J.-JOMS.2021.04.001.

- [4] G. Yavas, K. E. Caliskan, and M. S. Cagli, "Three-dimensional-printed marker- based augmented reality neuronavigation: a new neuronavigation technique", *Neurosurg Focus*, vol. 51, no 2, p. E20, Aug. 2021, doi: 10.3171/2021.5.FOCUS21206.
- [5] F. Müller, S. Roner, F. Liebmann, J. M. Spirig, P. Fürnstahl, and M. Farshad, "Augmented reality navigation for spinal pedicle screw instrumentation using intraoperative 3D imaging", *Spine Journal*, vol. 20, no 4, pp. 621–628, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.spinee.2019.10.012.
- [6] H. W. Goo, S. J. Park, and S. J. Yoo, "Advanced Medical Use of Three-Dimensional Imaging in Congenital Heart Disease: Augmented Reality, Mixed Reality, Virtual Reality, and Three-Dimensional Printing," *Korean J Radiol*, vol. 21, no. 2, pp. 133–145, Feb. 2020, doi: 10.3348/KJR.2019.0625.
- [7] E. Kabuye, · Philip Leduc, and J. Cagan, "A mixed reality system combining augmented reality, 3D bio-printed physical environments and inertial measurement unit sensors for task planning," vol. 27, pp. 1845–1858, 2023, doi: 10.1007/s10055-023-00777-0.
- [8] R. Moreta-Martinez, D. García-Mato, M. García-Sevilla, R. Pérez-Mañanes, J. Calvo- Haro, and J. Pascau, "Augmented reality in computer-assisted interventions based on patient-specific 3D printed reference", *Healthc Technol Lett*, vol. 5, no. 5, pp. 162–166, Oct. 2018, doi: 10.1049/HTL.2018.5072.
- [9] Cardenas Navarro Yesly Dayana and Lozano Melgarejo Loreta Marcela, "Innovation In Biomedical Use Equipment For Treatments In Surgical Specialties Systematic Review", 2024.
- [10] R. Moreta-Martinez, A. Pose-Díez-De-La-Lastra, J. A. Calvo-Haro, L. Mediavilla- Santos, R. Pérez-Mañanes, and J. Pascau, "Combining Augmented Reality and 3D Printing to Improve Surgical Workflows in Orthopedic Oncology: Smartphone Application and Clinical Evaluation", 2021, doi: 10.3390/s21041370.
- [11] Y. H. Yun, D. H. Shin, and H. J. Choi, "Perspectives of Medical Students and Developers Regarding Virtual Reality, Augmented Reality, Mixed Reality, and 3D Printing Technologies: Survey Study," *JMIR XR Spatial Comput* 2024; 1:e54230 <https://xr.jmir.org/2024/1/e54230>, vol. 1, no 1, p. e54230, May 2024, doi: 10.2196/54230.
- [12] Karageorgos F, Karolos I, Pettas T, Tsioukas V, Pikridas C, and Tsoulfas G, "The Role of 3D Printing and Augmented Reality in the Management of Hepatic Malignancies," *Technology in Cancer Research and Treatment*. Accessed: October 20, 2025. [Online]. Available in: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.1177/15330338251323138?src=getft&utm_source=mendeley&getft_integrator=mendeley



REVISTA INGENIO

Determination of experimental flow curves for a 6" Parshall flume based on the variation in the channel bottom slope.

Determinación de curvas de aforo experimentales para una canaleta Parshall de 6" a partir de la variación de la pendiente de fondo del canal

Darío Nicolás Calderón Vásquez | Centro de Investigaciones y Estudios de Ingeniería de los Recursos Hídricos (CIERHI) – Escuela Politécnica Nacional. Quito - Ecuador

Ricardo Sebastián Sandoval Garzón | Centro de Investigaciones y Estudios de Ingeniería de los Recursos Hídricos (CIERHI) – Escuela Politécnica Nacional. Quito - Ecuador

Recibido: 30/10/2025

Recibido tras revisión: 29/04/2026

Aceptado: 15/07/2026

Publicado: 31/07/2026

PALABRAS CLAVE

Estructuras hidráulicas, ingeniería hidráulica, medición hidrológica, métodos de medición, aforador Parshall, medición del caudal de descarga de agua.

RESUMEN

En este artículo se reportan los resultados de la investigación basada en pruebas experimentales en laboratorio de un aforador Parshall de 6 pulgadas de ancho de garganta, diseñado y construido según la norma ASTM D1941-21, constituido en polimetilmetacrilato (acrílico), instalado en el interior del canal hidrodinámico del Centro de Investigaciones y Estudios de Ingeniería de los Recursos Hídricos de la Escuela Politécnica Nacional (CIERHI – EPN); las pruebas determinan la variación de los caudales aforados en función de la variación de las pendientes del fondo del canal hidrodinámico (5 pendientes) en condiciones de descarga libre; se comparan entre las curvas de aforo experimentales resultantes y la curva teórica - empírica normada, se obtienen los errores y diferencias relativas y se establecen zonas gráficas del ábaco correspondiente, donde el máximo error relativo tolerable para los caudales aforados con la curva teórica es $E_r=10\%$.

KEY WORDS

Hydraulic structures, hydraulic engineering, hydrological measurement, measuring methods, Parshall Flume, water discharge flow measurement.

ABSTRACT

This article reports the results of research based on experimental laboratory tests of a Parshall flume with a 6-inch throat width, designed and constructed in accordance with ASTM D1941-21 standard, made of polymethyl methacrylate (acrylic), installed inside the hydrodynamic channel of the Center for Research and Studies in Water Resources Engineering at the National Polytechnic School (CIERHI – EPN); the tests determine the variation in measured flow rates based on the variation in the slopes of the bottom of the hydrodynamic channel (5 slopes) under free discharge conditions. The resulting experimental flow curves are compared with the standardized theoretical-empirical curve, the relative errors and differences are obtained, and graphic zones are established on the corresponding chart, where the maximum tolerable relative error for the flow rates measured with the theoretical curve is $E_r=10\%$.

1. INTRODUCCION

In hydraulic engineering, it is vitally important to measure flow rates for the various uses and needs of humans in their activities. Parshall flumes, developed by Ralph L. Parshall in 1920, are used to accurately measure flow rates in open channels and canals with free surface flow, such as: water distribution channels, municipal sewers, ditches, drinking water and wastewater treatment plants, irrigation channels, dam discharges, industrial effluents, and leachate discharges [1] and as a device for the rapid mixing and dispersion of coagulants in water

treatment systems.

The Parshall flume must be designed to connect to an approach section with subcritical flow (low velocities) by means of a section with an ascending bottom ramp and circular flaring on its walls, followed by a converging section with a level bottom, a throat section with a descending inclined bottom, and a diverging section with an ascending

inclined bottom [2], all with vertical walls [3]; this design forces the flow to accelerate [4] and transform it inside to supercritical, with velocities greater than in the approach section [5]; when forcing a change in regime, critical flow is imminent in a specific section within the flume, hence the name critical depth meters for gauging structures that contemplate bottom elevations and/or transverse contractions, with Parshall flumes being the most widely used in this category [5]. Critical flow has a unique surface profile for each flow rate, therefore, there is a direct relationship between the depth near the critical depth zone and the circulating flow rate, expressed through an empirical equation that allows the estimation of flow rates by entering the depth values in a defined section; This equation is independent of channel roughness and other uncontrollable factors [5], is specific to the geometry of each Parshall flume, and has the following form [6]:

$$Q = C \cdot H_a^n \quad (1)$$

Where Q is the measured flow rate; C is a dimensional factor that depends on the throat width; H_a is the critical flow depth within the converging section, measured at a distance of $2/3$ of L_c (convergence length) from the start of the throat; n is a dimensionless exponent that depends on the throat width [2].

For each Parshall flume with a standard throat width W_t , operating in free flow, there are theoretical values of C and n , whose values vary depending on the units for length and volume used. For example, for the throat width chosen for this research, $W_t = 6'' = 0.152 \text{ m}$, for flow rates in l/s and depths in cm, $C = 0.264$ and $n = 1.58$ [6], while for flow rates in m^3/s and depths in m, $C = 0.3812$ and $n = 1.58$ [2]; the latter were used for this research, resulting in equation (2).

$$Q = 0.3812 \cdot H_a^{1.58} \quad (2)$$

Where Q is the measured flow rate; H_a is the critical flow depth within the converging section, measured at a distance of $2/3$ of L_c (convergence length) from the start of the throat.

Each of the 22 standardized Parshall flumes is mainly characterized and named by its throat width W_t , with standardized geometries, dimensions, and flow ranges, which must be kept accurate (tolerable error 2%) since they are not scale hydraulic models of each other; they are completely different, given that the length and slope of the throat bottom remain constant for several of them, while other dimensions vary [2]. Their inner surface should be at least as smooth as the surface of good quality concrete [6]. For this reason, and in order to visualize and measure the flows, the experimental setup for this research was constructed in acrylic.

A Parshall flume with a throat width $W_t = 6'' = 0.152 \text{ m}$, under free discharge conditions, has the capacity to measure flows from 1.42 L/s to 110.4 L/s ($0.00142 \text{ m}^3/\text{s}$ - $0.11040 \text{ m}^3/\text{s}$) [2], with depths H_a from 0.029 m to 0.456 m , respectively; the inlet section has a ramp with a slope of 1:4 to the start of the convergent section and, as it is a $W_t < 1 \text{ ft}$, a flare with circular walls of radius $R = 0.41 \text{ m}$; at the outlet of the divergent

section there may be a step to the bottom of the channel [3] (see Fig. 1).

In a Parshall flume, the ratio between the representative depths of the flow H_b and H_a is called the percentage of submergence or, for practical purposes, simply submergence S , defined by equation (3):

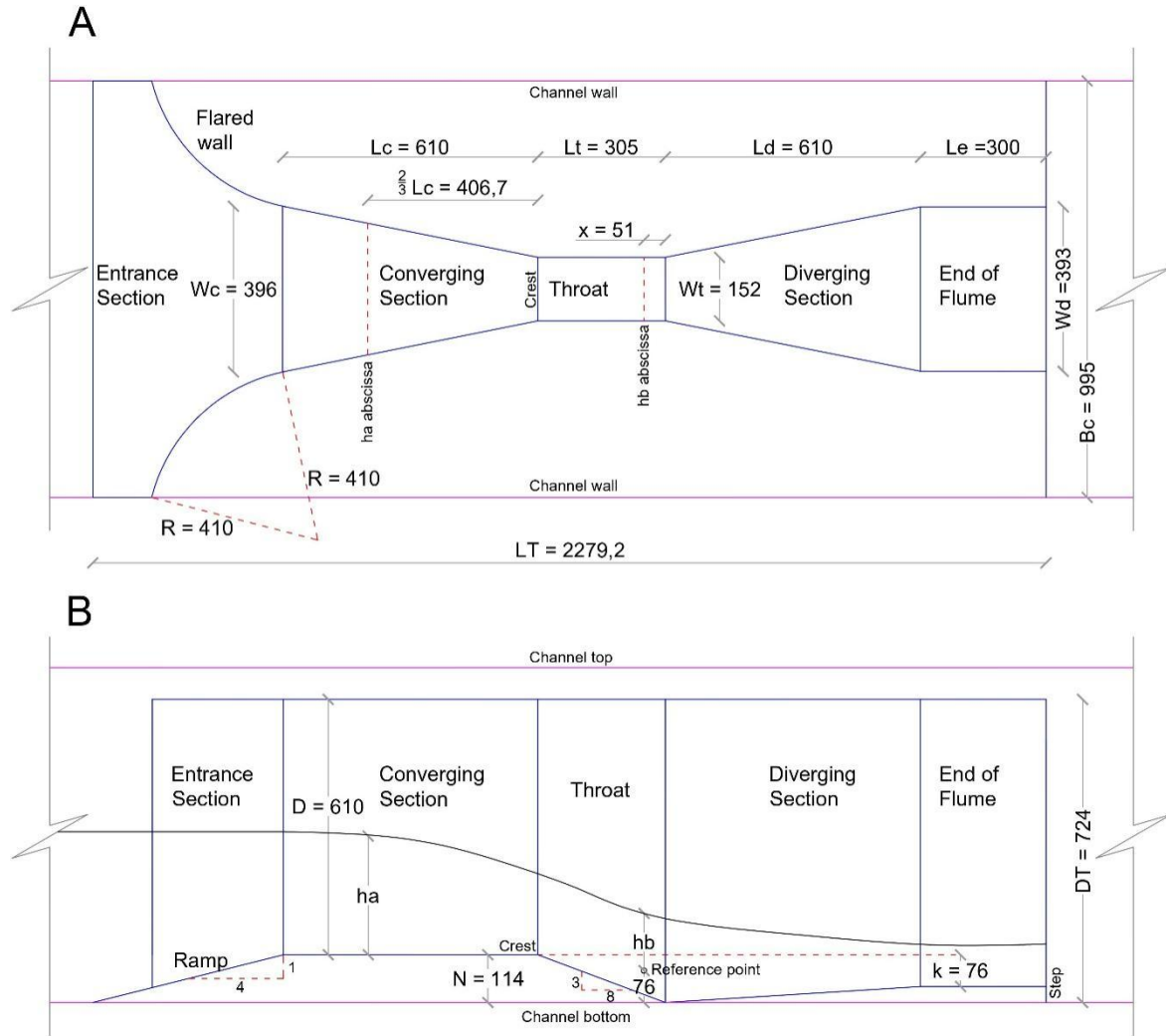
$$S = H_b/H_a \quad (3)$$

Where $S(\%)$ is the submergence, H_b is the depth near the end of the throat, and H_a is the critical flow depth measured in the converging section, measured at a distance of $2/3$ of L_c from the start of the throat (see Fig. 1.). Both depths must have the same units of length.

Depending on the submergence, there are two possible flow conditions inside a Parshall flume:

- Free flow: occurs when, downstream of the flume, the water surface is not high enough to reduce the flow through it; in this case, provided that the bottom of the channel remains horizontal, only a single reading at the main measurement point (H_a) is needed to calculate the measured flow using the general theoretical equation (1). The limit of S is established for each Parshall flume, for example, for $W_t = 6'' = 0.152 \text{ m}$, $S_{\text{Limit}} = 60\%$, if $S < S_{\text{Limit}}$ then the flow is free [6].
- Submerged flow: drowning occurs due to hydraulic conditions downstream of the gauge, existing obstacles, lack of slope, and/or forced levels in subsequent sections [3], causing the water surface elevation to be high enough to reduce the flow velocity, increase upstream depths, and thus create a backwater effect and greater resistance, decreasing the flow through the gauge. This additionally requires the reading of a depth H_b near the final section of the throat [1] to apply negative or reduction corrections to the Q result calculated with (1), using diagrams or abacuses as a function of S for different flow meter sizes. For $W_t = 6'' = 0.152 \text{ m}$, if $S > 60\%$ then the flow is submerged [6]; S must be kept below the practical limit of 95%, because the measurement will not be reliable if the submergence is greater [5]. $W_t = 6''$ corresponds to a small flow meter; therefore, the position of the reference point for measuring the depths H_b is 51 mm upstream and 76 mm above the lowest point at the end of the throat (see Fig. 1). The most desirable condition in practice is free flow [6], because it will be restricted to a single load measurement [3], and a double measurement results in a significant loss of accuracy [4].

Figure 1. Diagram of the parts and measurements of the experimental Parshall flume setup located inside the CIERHI hydrodynamic channel; A) Plan view; B) Longitudinal section.



Likewise, expression (1) does not take into account possible settlements of the Parshall flume, therefore, various authors propose correction coefficients for C and n in view of possible inclinations or slopes of the convergent section of the flume; this research focuses on the experimental determination of precise values for C and n for five different slopes, within a moderate range in which the flume adequately fulfills its function. The Parshall flume should be constructed and installed in such a way that the bottom of the convergent zone (floor or ground) is level within a slope that does not exceed 3 mm in any dimension [6].

The main advantages of Parshall flumes are:

- The head loss in Parshall flumes is low, less than approximately one quarter of that required to operate a thin-walled, sharp-crested weir (with the same control width) [4].
- They are self-cleaning in the case of flows containing moderate amounts of solids, unlike weirs, where sediments or suspended particles will settle in the upstream reservoir, gradually changing its discharge coefficient [5];
- They can withstand relatively high degrees of submergence and still be accurate [1];

- Their construction, installation, and operation inside open channels represent low costs and technical advantages;
- They can be constructed from various materials: concrete, masonry, wood, metal, brass, etc.;
- They do not require the bottom to be raised, i.e., the channel does not need to be modified in terms of its dimensions for the setup of a Parshall flume;
- If the flow is free, it is sufficient to measure the depth in a single section to determine the flow rate accurately [3];
- Their designs are available for W_t from 2.54 cm to 15.2 m, covering flow measurements from 0.0057 to 85 m³/s [6].

The main disadvantages of Parshall flumes are:

- They can be more expensive than a sharp-edged weir or submerged orifices in unlined channels [4];
- They cannot be used directly or in combination with an upstream gate [5];
- They are only applicable to open channels and are inoperative under pressurized flow or full pipe conditions [6].

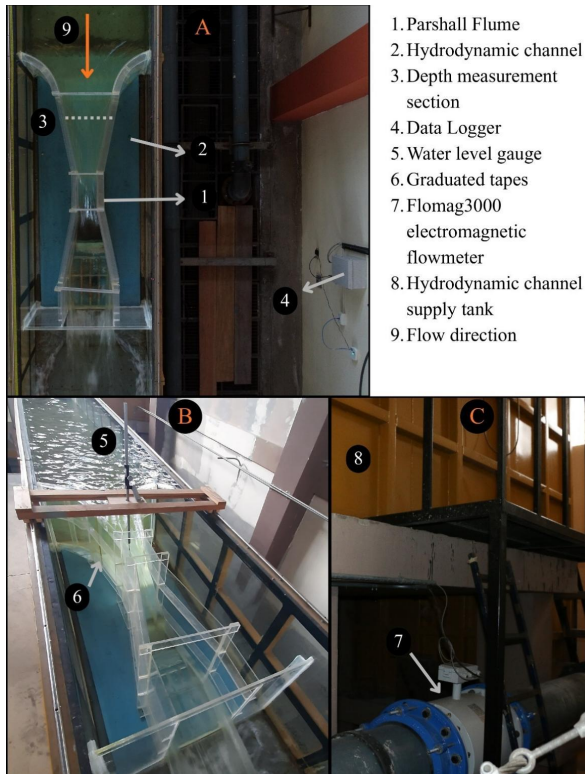
2. Methodology

The experimental setup consists mainly of a hydrodynamic channel, which is a steel structure, 1 meter wide and 25 meters long, and a SCADA control system for adjusting its slope between 0.10% and 3.76%. Inside, the primary flow measurement instrument is installed, namely the Parshall flume (see Fig. 2. A), whose secondary instruments for measuring water depth are a needle limnimeter (water level gauge) with a 0.0001 m resolution and graduated tapes (as staff gages) with 0.001 m resolution (see Fig. 2. B); the precise and accurate reference flow measurement instrument is the Flomag3000 electromagnetic flowmeter, which measures and records flow rates (see Fig. 2. C).

Parshall flume was constructed entirely of acrylic, with a wooden base to ensure its coupling and structural stability within the hydrodynamic channel. It is located at +4.70 meters, which complies with the recommendation for the length of the inlet flow approximation of the hydraulic structure, which should be at least 10 to 20 times the throat width, i.e., greater than 3.04 m. [6].

2.1 Experimental setup calibration

Figure 2. Experimental setup: A) Parshall flume general layout inside the hydrodynamic channel; B) Water level gauge and graduated tapes used to water depth measures; C) Flomag3000 electromagnetic flowmeter.



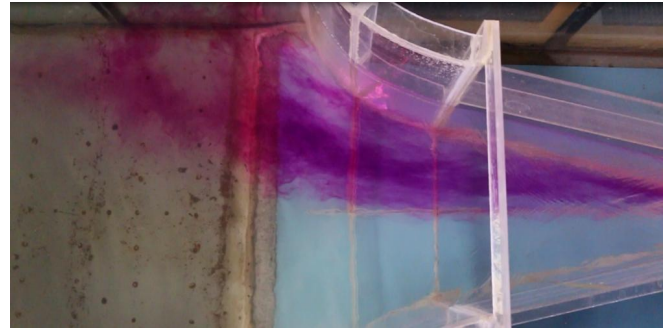
The experimental setup first undergoes a hydraulic leak test to determine the existence of and correct any possible water leaks, completely flooding the interior of the Parshall flume. All the construction dimensions obtained for the Parshall flume are within the permissible error limit of 2% compared to the standardized dimensional values for the structure selected for a throat width $W_t = 6'' = 0.152 \text{ m}$ (see Table 1).

Table 1. Construction dimensions and errors obtained in the Parshall flume.

	Parshall Flume design dimensions		Actual dimensions built	Error	
	$W_t = 6'' = 0.152 \text{ m}$ [6]				
	Symbol	ft	mm	mm	%
Throat width	W_t	0.50	152.4	152.0	-0.4 0.26%
Convergence width	W_c	1.30	396.2	396.0	-0.2 0.06%
Divergence width	W_d	1.29	393.2	393.0	-0.2 0.05%
Convergence length	L_c	2.00	609.6	610.0	0.4 0.07%
Throat length	L_t	1.00	304.8	305.0	0.2 0.07%
Divergence length	L_d	2.00	609.6	610.0	0.4 0.07%
Walls height	D	2.00	609.6	610.0	0.4 0.07%
Vertical distance from the crest to the bottom throat	N	0.38	114.3	114.0	-0.3 0.26%
Vertical distance from the crest to the lower end of the flume	K	0.25	76.2	76.0	-0.2 0.26%
Inlet curvature radius	R		410.0	410.0	0.0 0.00%

In addition, its optimal hydrodynamic performance and uniform distribution of streamlines at the inlet of the flare (see Fig. 3) were verified with the circulation of various flow rates, thus confirming the perfect conditioning of joints and edges. The hydrodynamic behavior of the structure was tested under critical operating conditions to ensure that water level readings can be taken without any interference that could generate anomalous data.

Figure 3. Uniform streamlines distribution verification at Parshall flume inlet.



2.2 Electromagnetic flowmeter as reference measuring instrument.

There are two basic types of flow meters: long-throat and short-throat; within the latter group are Parshall flumes, since they control the flow in a region where curvilinear flow occurs; the calibration process for these structures is determined empirically by comparison with other more precise and accurate reference measurement systems [4], such as electromagnetic flow meters. This research, all flows are measured using the Flomag3000 electromagnetic sensor flow meter as a reference system for testing the Parshall flume, which is installed in the hydrodynamic channel inlet pipe. This equipment, with a nominal diameter of 300 mm and connected to a real-time transmission system, stores the records every 30 seconds in a YDOC ML-x17 data logger, and allows for a complete record of the series flow rates for each tests planned.

2.3 Testing plan.

Following the recommendations and methodology of the applicable regulations [6], for each of the five slopes tested for the hydrodynamic channel, experimental tests were carried out with 12 flow rates Q

(within the corresponding range $0.00142 \text{ m}^3/\text{s}$ - $0.11040 \text{ m}^3/\text{s}$), measuring 5 times each water depth H_a on the corresponding abscissa $2A/3$ in the convergent zone; a total of sixty tests were performed, generating a 300 water depth measurements data set (see Table 2).

Table 2. Flow rates corresponding to the 60 tests planned to be carried out at the experimental setup.

		Hydrodynamic Channel Slope - s (%)				
		0,10	1,00	2,00	3,00	3,76
Target flow rates (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)
	0,005	Q ₁	Q ₁₃	Q ₂₅	Q ₃₇	Q ₄₉
	0,015	Q ₂	Q ₁₄	Q ₂₆	Q ₃₈	Q ₅₀
	0,025	Q ₃	Q ₁₅	Q ₂₇	Q ₃₉	Q ₅₁
	0,035	Q ₄	Q ₁₆	Q ₂₈	Q ₄₀	Q ₅₂
	0,045	Q ₅	Q ₁₇	Q ₂₉	Q ₄₁	Q ₅₃
	0,055	Q ₆	Q ₁₈	Q ₃₀	Q ₄₂	Q ₅₄
	0,065	Q ₇	Q ₁₉	Q ₃₁	Q ₄₃	Q ₅₅
	0,075	Q ₈	Q ₂₀	Q ₃₂	Q ₄₄	Q ₅₆
	0,084	Q ₉	Q ₂₁	Q ₃₃	Q ₄₅	Q ₅₇
	0,090	Q ₁₀	Q ₂₂	Q ₃₄	Q ₄₆	Q ₅₈
	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)
	0,100	Q ₁₁	Q ₂₃	Q ₃₅	Q ₄₇	Q ₅₉
	0,103	Q ₁₂	Q ₂₄	Q ₃₆	Q ₄₈	Q ₆₀

2.4 Error sources

The hydrodynamic channel allows the converging section of the Parshall flume to be leveled, both laterally and longitudinally, to obtain accurate readings. Flows with depth values $H_a < 30 \text{ mm}$ was avoided to comply with the criteria and recommendations of tests carried out in similar experimental setups; in addition, the recommendation to keep the approach section free of moss or other debris accumulation during the tests was strictly followed [6]. Regarding reference instrument errors, the accuracy of the Flomag3000 flow meter is guaranteed with an error within the range of 0.5% - 2.2%, according to the manufacturer [7].

3. Results and Discussion

Table 3 shows the average results of the 5 H_a measurements taken in each of the 60 tests in the experimental setup test plan, corresponding to the 12 flow rates Q for each of the 5 slopes investigated.

Table 3. Results of the average depths and flow rates corresponding to the 60 tests in the experimental setup test plan.

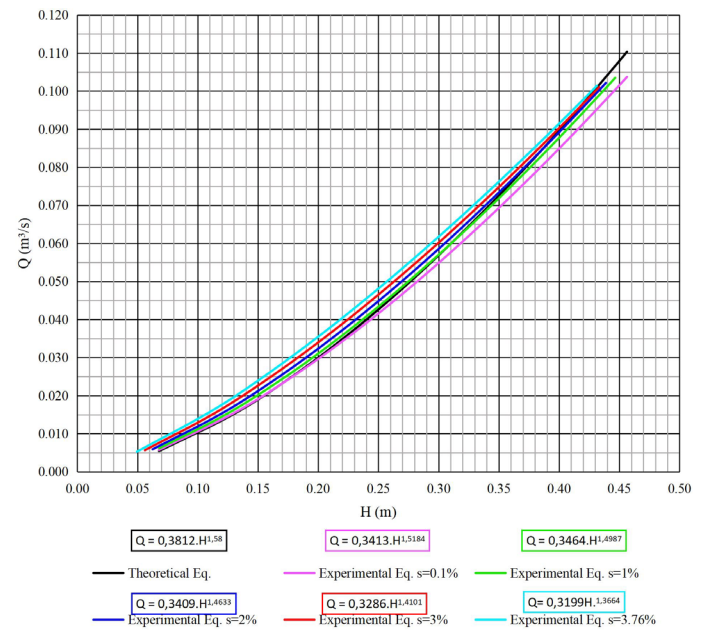
		Hydrodynamic Channel Slope - s (%)									
		0,10	1,00	2,00	3,00	3,76					
Experimental flow rates (m^3/s)	H_a (m)	H_a (m)	H_a (m)	H_a (m)	H_a (m)	H_a (m)	H_a (m)	H_a (m)	H_a (m)	H_a (m)	H_a (m)
	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)
	0,0678	0,00570	0,0681	0,00618	0,0625	0,00602	0,0562	0,00592	0,0495	0,00564	
	0,1307	0,01550	0,1242	0,01520	0,1209	0,01524	0,1149	0,01494	0,1134	0,01520	
	0,1791	0,02525	0,1744	0,02500	0,1689	0,02488	0,1641	0,02497	0,1585	0,02505	
	0,2241	0,03540	0,2155	0,03473	0,2114	0,03482	0,2075	0,03513	0,2026	0,03518	
	0,2638	0,04525	0,2555	0,04502	0,2498	0,04470	0,2448	0,04523	0,2412	0,04506	
	0,2996	0,05510	0,2912	0,05506	0,2856	0,05473	0,2818	0,05521	0,2761	0,05537	
	0,3372	0,06550	0,3283	0,06560	0,3227	0,06511	0,3170	0,06527	0,3130	0,06517	
	0,3709	0,07565	0,3619	0,07520	0,3572	0,07566	0,3516	0,07525	0,3443	0,07517	
	0,3958	0,08355	0,3871	0,08345	0,3795	0,08267	0,3769	0,08318	0,3725	0,08409	
	0,4178	0,09035	0,4083	0,09036	0,4044	0,09080	0,3977	0,09053	0,3921	0,09029	
	0,4466	0,09995	0,4365	0,10000	0,4324	0,10038	0,4286	0,10043	0,4206	0,10031	
	0,4564	0,10310	0,4466	0,10277	0,4389	0,10292	0,4333	0,10224	0,4314	0,10313	

Based on the values in Table 3 and the theoretical equation (2), the trend curves in Figure 4 are plotted and the respective experimental flow equations are obtained. The experimental flows in Table 3 are, in each case, the average flow of the flow meter, i.e., the average value of the instantaneous flows measured by the Flomag3000 flow meter during the test and reported by the Data Logger controller and its YDOC - Insights software. The coefficients of determination R^2 corresponding to the trend lines used to obtain the experimental flow equations and curves for the Parshall flume (see Fig. 4) have values very close to or equal to 1 (between 0.9984 and 1.0000) for the five slopes tested. Therefore, it is concluded that there is an adequate fit between the values obtained from these equations/curves and the values recorded experimentally for all the slopes analyzed. As can be seen in the respective experimental curves (see Fig. 4), the experimental equations obtained for the five slopes tested are, respectively:

$$\begin{aligned} \text{Experimental equation for } s = 0.1\%: & Q = 0.3413 \cdot H_a^{1.5184} \quad (4) \\ \text{Experimental equation for } s = 1.0\%: & Q = 0.3464 \cdot H_a^{1.4987} \quad (5) \\ \text{Experimental equation for } s = 2.0\%: & Q = 0.3409 \cdot H_a^{1.4633} \quad (6) \\ \text{Experimental equation for } s = 3.0\%: & Q = 0.3286 \cdot H_a^{1.4101} \quad (7) \\ \text{Experimental equation for } s = 3.76\%: & Q = 0.3199 \cdot H_a^{1.3664} \quad (8) \end{aligned}$$

Where s is the slope of the channel bottom or the bottom of the convergent zone; Q is the measured flow rate; H_a is the critical flow depth within the convergent section, measured at a distance of $2/3$ of L_c (convergence length) from the start of the throat.

Figure 4. Experimental curves and equations for the five slopes of the Parshall flume tested, compared with the theoretical curve and expression (2).



When comparing the different experimental flow curves for the Parshall flume tested, there is a clear trend of variation depending on the slopes to which they were subjected (see Fig. 4); on the one hand, there is parallelism between all the curves for the different slopes, i.e., they do not intersect each other at any point; in contrast, the curve of the

theoretical flow measurement equation intersects with all the experimental curves at a different point with each of them. This parallelism is indicative of the direct relationship between the increase in the slope of the Parshall flume and the increase in the measured flow, for the same depth H_a .

There is a clear trend in the experimental curves (see Fig. 4): with the same depth H_a , higher flows are measured as the slope of the channel bottom increases; this trend is maintained for the entire range of flows tested with the different slopes. For example, with a depth $H_a = 0.35\text{m}$ for a channel slope $s = 0.1\%$, a flow rate $Q = 0.069\text{m}^3/\text{s}$ is measured; with the same depth for a slope of $s = 3.76\%$, a flow rate of $Q = 0.076\text{m}^3/\text{s}$ is measured, while the corresponding theoretical flow rate is $Q = 0.073\text{m}^3/\text{s}$. In this example, the difference in measured flow rates between the minimum and maximum slopes is 9.95%, while the difference with respect to the theoretical equation is 4.64%.

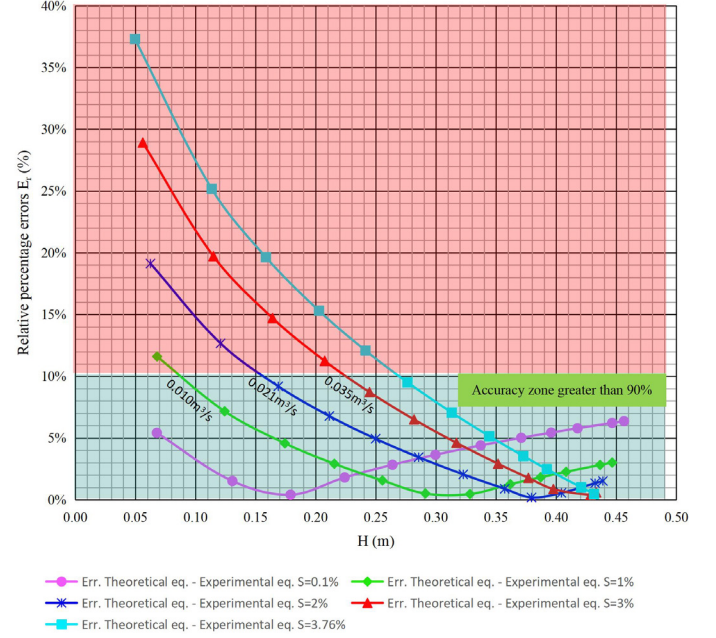
Another example that confirms the trend: with a depth $H_a = 0.44\text{m}$ for a channel slope $s = 0.1\%$, a flow rate $Q = 0.098\text{m}^3/\text{s}$ is measured; with the same depth for a slope of $s = 3.76\%$, a flow rate of $Q = 0.104\text{m}^3/\text{s}$ is measured, while the corresponding theoretical flow rate is $Q = 0.104\text{m}^3/\text{s}$. In this example, the difference in measured flow rates between the minimum and maximum slopes is 6.19%, while the difference with respect to the theoretical equation is 6.12%.

When comparing each experimental flow curve individually with the theoretical curve (see Fig. 4), it is evident that there are areas where the theoretical equation overestimates the experimental flow (when the theoretical curve is above the experimental curve) and others where it underestimates the experimental flows (when the theoretical curve is below the experimental curve). For example, for the minimum slope tested, $s = 0.1\%$, the theoretical equation overestimates the flow rates in most of the corresponding depth range; conversely, for the maximum slope tested, $s = 3.76\%$, the theoretical equation underestimates the flow rates in practically the entire depth range.

The relative percentage errors determined by comparing the different theoretical and experimental values were calculated and plotted in order to determine their trends and obtain the maximum values for each of the slopes tested (see Fig. 5), as well as to provide a visual guide for identifying the areas in which the theoretical equation is most accurate and therefore most valid. For example, starting from a maximum tolerable error empirically established at $E_r = 10\%$ (minimum required accuracy of 90%), the green background area was defined in the graph where the accuracy of the flows measured with the theoretical equation is greater than 90% in relation to the experimental flows. while in the complementary red background area, the accuracy is less than 90%, therefore the flows measured with the theoretical equation would be inaccurate for the ranges defined in this area. Therefore, the theoretical equation is relatively accurate and valid across the entire flow range only for slopes $s \leq 0.1\%$, while it is accurate for certain specific flow ranges, those greater than $0.010\text{m}^3/\text{s}$, $0.021\text{m}^3/\text{s}$, $0.035\text{m}^3/\text{s}$ and $0.047\text{m}^3/\text{s}$ for slopes $s = 1\%$, $s = 2\%$, $s = 3\%$

and $s = 3.76\%$, respectively; these flow rates are shown in Figure 5 as the limits from which it is recommended to use the theoretical equation, with an accuracy of at least 90% ($E_r \leq 10\%$).

Figure 5: Relative percentage errors E_r of Q values obtained with the theoretical equation vs. Q obtained with the experimental equation of the Parshall flume with throat width $W_t = 6'' = 0.152\text{m}$, with channel slopes $s = 0.1\%$, $s = 1\%$, $s = 2\%$, $s = 3\%$ and $s = 3.76\%$.



The graph in Figure 5 shows that the first trend observed is: the greater the slope of the bottom, the greater the relative percentage errors; therefore, the greatest relative errors correspond to the slope $s = 3.76\%$. The second trend shown is that the lower the measured flow rates, the greater the percentage errors in the flow rates calculated using the theoretical equation. These trends are partially fulfilled for the curves corresponding to slopes $s = 0.1\%$ and $s = 1\%$.

When comparing each experimental curve with the theoretical curve (see Fig. 4), only the points of intersection between curves have the same ordered pair of theoretical and experimental values (depth and flow rate), therefore, these points correspond to relative percentage errors $E_r = 0\%$ (see Fig. 5).

The inaccuracy in flow measurement using the theoretical equation in cases where the channel bottom has a slope $s > 0.1\%$ (slope of the bottom in the convergent zone) can be attributed to the fact that, in determining the general theoretical equation (2), the effects of variations in certain hydraulic factors, such as the effect of slope variation on flow rates, were not taken into account or considered, i.e., the relative accuracy of the general theoretical equation (2) applies only to horizontal bottoms and slopes $s \leq 0.1\%$.

4. Conclusions

Throughout this research, the importance and necessity of having experimental curves and equations suitable for hydraulic conditions not covered in the determination of theoretical expressions has been demonstrated, as in this case, where the theoretical equation for measuring flows with the Parshall flume should only be used for free flow conditions and for a horizontal channel bottom (as well as for a horizontal bottom in the convergent zone), with a maximum slope of $s=0.1\%$, so that the flows measured across the entire possible range maintain a minimum established accuracy of 90%, i.e., with relative errors $E_r \leq 10\%$.

Given the need and in order to ensure practicality for all types of users, it is understandable that various bibliographic sources provide an intentional simplification by reducing the relationship between depths and flows (independent of the slope) to a single mathematical expression or measurement equation for each of the 22 existing Parshall flumes, as in this case using equation (2) for those with $W_t=0.152\text{ m}$; however, it is necessary for these sources to emphasize and warn of the urgent need to comply with the horizontal condition and minimum slope ($s \leq 0.1\%$) of the bottom of the channel where the flume is installed and/or the bottom of its convergent zone.

In the case of Parshall flumes with channel bottom slopes and/or convergent zone slopes $s > 0.1\%$, the equations and experimental curves obtained based on laboratory tests offer a better and more accurate mathematical representation that relates flow rates Q as a function of depths h_a for each slope tested. This is because a single universal theoretical equation (2) is indicated for horizontal or low-slope bottoms ($s \leq 0.1\%$). This emphasizes the need to experimentally test the hydraulic measuring structures that will operate under specific conditions in order to find the equations and curves that take them into account, given that general theoretical expressions do not.

For Parshall flumes with a throat width $W_t=6''=0.152\text{ m}$, it is recommended to use the theoretical equation (2) only for the ordered pairs H_a-E_r located within the green background area of the graph in Figure 5, for which a relative error $E_r < 10\%$ corresponds; the flow rates shown at the intersection of each experimental curve with the tolerable relative error limit line $E_r = 10\%$, correspond to the flow rate limit value above which the theoretical equation is valid.

In short, for practical purposes in multiple industrial and field gauging applications, it is recommended to use equations (4), (5), (6), (7), and (8) for slopes $s=0.1\%$, $s=1\%$, $s=2\%$, $s=3\%$ and $s=3.76\%$, respectively. In cases where the bottom of the Parshall flume's converging zone has an intermediate slope within the tested range ($0.1\%-3.76\%$), it is recommended to interpolate the lower and upper flow values obtained using the graph in Figure 4 and/or the corresponding flow equations. For example, for a slope $s=2.6\%$ and depth $H_a=0.25\text{ m}$, the lower and upper flows obtained with equations (6) and (7) are $Q=0.045\text{ m}^3/\text{s}$ and $Q=0.047\text{ m}^3/\text{s}$, for slopes $s=2\%$ y $s=3\%$, respectively; therefore, when interpolating the values for the intermediate slope in the example, $Q=0.046\text{ m}^3/\text{s}$ is obtained.

The theoretical and experimental curves and equations resulting from this research should only be used for Parshall flumes with a throat width $W_t=6''=0.152\text{ m}$, whose geometry and dimensions are standardized; each of the 22 existing Parshall flumes are different, they do not have geometric similarity, they are not scale hydraulic models of each other. Likewise, they should only be used within the flow range of each flume, in this case for flows Q between 1.42 L/s and 110.4 L/s ($0.00142\text{ m}^3/\text{s}$ – $0.11040\text{ m}^3/\text{s}$), with depths H_a between 0.029 m and 0.456 m , respectively.

The accuracy of the experimental curves and equations will directly determine the accuracy of the flow measurement process using Parshall flumes. Therefore, in systems with particularities in their design, construction, and/or operation, it will be imperative to conduct a specific study that provides the expressions best suited to the variations present in the hydraulic parameters of each system.

References

- [1] D. Saran, N. K. Tiwari, and S. Ranjan, "Parshall Flumes: A Review," in Roorkee Water Conclave 2020, Roorkee, Feb. 2020, pp. 1–2. Accessed: Jul. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/357673836>
- [2] W. Vlotman, Discharge measurement structures, 3rd revised edition. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) and Delft Hydraulics Laboratory (DHL), 1989. Accessed: Jul. 30, 2025. [Online]. Available: <https://edepot.wur.nl/64285>
- [3] J. M. Azevedo, Manual de Hidráulica, Sexta Edición. México D.F.: Editorial Harla, 1975.
- [4] USBR, Water Measurement Manual, 3rd Edition. Washington, 2001.
- [5] V. Te Chow, Hidráulica de Canales Abiertos Ven Te Chow. Bogotá: McGraw Hill Interamericana, 1994.
- [6] ASTM, "ASTM D1941 – 21: Standard Test Method for Open Channel Flow Measurement of Water with the Parshall Flume," Dec. 15, 2021, West Conshohocken, PA, United States of America: D1941 – 21. doi: 10.1520/D1941-21.
- [7] FLOMAG s.r.o., "Magnetic Flowmeter FLOMAG® 3000 Installation and Operation Manual," 2021, Brno. [Online]. Available: www.flomag.com



REVISTA INGENIO

Variabilidad de la Producción de Energía Eléctrica en el Sistema Nacional Interconectado del Ecuador según Tipo de Tecnología Generadora

Variability of Electric Power Production in Ecuador's National Interconnected System by Type of Generation Technology

Brayan Steeven Salmon Barzola | Universidad Iberoamericana del Ecuador

Recepción: 29/04/2026
Recepción tras revisión: 29/06/2026
Aceptado: 15/07/2026
Publicado: 31/07/2026

PALABRAS CLAVE
Fuentes de energía renovables, producción de energía eléctrica, análisis estadístico, tratamiento de datos, sistemas de energía

KEY WORDS
Renewable energy sources, electric power generation, statistical analysis, data processing, energy systems

RESUMEN
La dependencia histórica del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador en la generación hidroeléctrica, que representa entre el 75% y el 85% de la producción total, generó una vulnerabilidad estructural evidenciada durante la crisis energética de 2023-2024, cuando el país aplicó racionamientos de hasta ocho horas diarias. Esta investigación analiza la variabilidad de la producción de energía eléctrica por tipo de tecnología generadora en el SNI mediante técnicas de Big Data y Ciencia de Datos, utilizando datos oficiales abiertos del CENACE correspondientes al período enero 2025 – marzo 2026. Se aplicó un pipeline de procesamiento en Python que incluyó limpieza, transformación y análisis estadístico de 5.886 registros mensuales de producción. Los resultados revelan que la tecnología térmica presenta el mayor coeficiente de variación con 163%, seguida de biomasa con 163% e hidroeléctrica con 141%, mientras que la eólica con 60% y el biogás con 44% son las tecnologías más estables del sistema. Se concluye que la diversificación de la matriz energética hacia tecnologías de menor variabilidad, particularmente eólica y biogás, constituye una estrategia prioritaria para reducir la vulnerabilidad del sistema eléctrico ecuatoriano ante condiciones climáticas adversas.

ABSTRACT
Ecuador's National Interconnected System has historically relied on hydroelectric generation, which accounts for 75% to 85% of total production, creating a structural vulnerability exposed during the 2023-2024 energy crisis, when the country implemented power rationing of up to eight hours per day. This research analyzes the variability of electric power production by generation technology type in the SNI using Big Data and Data Science techniques, based on official open data from CENACE for the period January 2025 – March 2026. A Python-based processing pipeline was applied, including cleaning, transformation, and statistical analysis of 5,886 monthly production records. Results show that thermal technology presents the highest coefficient of variation at 163%, followed by biomass at 163% and hydroelectric at 141%, while wind energy at 60% and biogas at 44% are the most stable technologies in the system. It is concluded that diversifying the energy matrix toward lower-variability technologies, particularly wind and biogas, is a priority strategy to reduce the vulnerability of Ecuador's electric system to adverse climate conditions.

1. INTRODUCCIÓN

El acceso confiable a la energía eléctrica constituye un factor determinante para el desarrollo económico y social de cualquier nación. En Ecuador, el Sistema Nacional Interconectado representa la infraestructura central mediante la cual se produce, transmite y distribuye la electricidad que abastece a hogares, industrias y servicios públicos en todo el territorio continental. Este sistema integra centrales de generación de diversas tecnologías bajo la coordinación del Operador Nacional de Electricidad CENACE,

entidad responsable del despacho centralizado de energía y de la publicación de estadísticas oficiales de producción [1].

Históricamente, el SNI ha dependido de la generación hidroeléctrica como fuente principal de energía, representando entre el 75% y el 85% de la producción total durante las últimas décadas. Esta concentración tecnológica fue posible gracias a la abundancia del recurso hídrico del país, favorecida por su ubicación geográfica en la zona intertropical y por la presencia de la cordillera de los Andes, que genera condiciones de precipitación y caudal apropiadas para

el aprovechamiento hidroeléctrico a gran escala. Durante años, esta decisión estratégica permitió mantener tarifas eléctricas competitivas, ampliar la cobertura del servicio eléctrico a nivel nacional y reducir la dependencia de combustibles fósiles importados [2].

Sin embargo, esta concentración tecnológica generó simultáneamente una dependencia estructural que expuso al sistema a riesgos significativos ante variaciones climáticas. La vulnerabilidad de esta dependencia quedó evidenciada de manera crítica durante la crisis energética de 2023 y 2024, provocada por la sequía asociada al fenómeno de El Niño, cuando Ecuador aplicó racionamientos eléctricos de hasta ocho horas diarias en distintas regiones del país y se vio obligado a importar energía de Colombia y Perú para cubrir el déficit de generación. Esta crisis, que afectó directamente a millones de ecuatorianos e impactó negativamente la productividad industrial y comercial del país, reveló que el sistema no contaba con respaldo suficiente en otras tecnologías para compensar la caída de la producción hidroeléctrica durante períodos prolongados de estiaje [1].

La crisis energética de 2023-2024 no fue un evento aislado ni completamente imprevisible. Ecuador ha experimentado episodios de estrés hídrico recurrentes asociados a fenómenos climáticos como El Niño y La Niña, cuya frecuencia e intensidad se proyecta que aumentará en el contexto del cambio climático global. Un estudio reciente de Sterl et al. publicado en *Nature Water* concluyó que Ecuador podría reducir significativamente el riesgo de apagones mediante la incorporación sostenida de energías eólica y solar a su matriz, señalando que la combinación de generación hidroeléctrica con fuentes renovables variables permitiría estabilizar el sistema eléctrico ante períodos de estiaje [2]. Sin embargo, para diseñar estrategias de diversificación efectivas, es necesario primero comprender con precisión cuánto varía la producción real de cada tecnología generadora a lo largo del tiempo y ante distintas condiciones climáticas.

A nivel internacional, el uso de Big Data y técnicas de Ciencia de Datos para el análisis de sistemas eléctricos ha crecido de forma sostenida durante la última década. Según datos del mercado de analítica energética, el segmento de Big Data en el sector energético alcanzó una participación del 42,5% en medición inteligente y se proyecta un crecimiento anual del 28,7% hasta 2030 en áreas de mantenimiento predictivo y gestión del rendimiento de activos [8]. Este crecimiento refleja el reconocimiento creciente de que los datos operativos de los sistemas eléctricos contienen información valiosa para la toma de decisiones que no puede extraerse mediante métodos de análisis convencionales.

En el ámbito latinoamericano, Santos-Dominguez et al. demostraron la viabilidad de aplicar pipelines de analítica sobre datos abiertos de operadores nacionales de electricidad para construir modelos de comportamiento y pronóstico energético, utilizando específicamente datos del operador eléctrico nacional de México [3]. Este trabajo es metodológicamente relevante para la presente investigación porque establece un precedente directo de aplicación de Ciencia de Datos sobre datos de operadores nacionales de electricidad en el contexto latinoamericano, demostrando que esta aproximación produce resultados útiles y publicables.

En el contexto ecuatoriano específicamente, Mullo et al. aplica-

ron técnicas de minería de datos al análisis de la calidad de energía en redes de distribución del SNI, demostrando que los datos del CENACE constituyen una fuente válida y suficiente para investigación científica aplicada al sistema eléctrico nacional [4]. Sin embargo, su enfoque se centró en la calidad de energía en redes de distribución, no en la variabilidad de la producción por tipo de tecnología generadora, que es el objeto de la presente investigación.

En cuanto a la variabilidad en sistemas de generación renovable, Benti et al. señalaron que uno de los principales desafíos en la integración de energías renovables es precisamente la gestión de la incertidumbre y variabilidad en la generación, y que el análisis de datos históricos de producción es el punto de partida indispensable para cualquier modelo de gestión de esa variabilidad [8]. Por su parte, Alazemi et al. concluyeron que las fuentes renovables introducen variabilidad al sistema eléctrico debido a su dependencia de condiciones estocásticas como radiación solar, temperatura y velocidad del viento, y que los análisis comparativos entre tecnologías son esenciales para orientar las decisiones de inversión en diversificación de matrices energéticas [5].

A pesar de estos avances en la literatura internacional, existe un vacío específico que ninguno de los trabajos revisados aborda: el análisis cuantitativo de la variabilidad de la producción eléctrica por tipo de tecnología generadora en el Sistema Nacional Interconectado del Ecuador usando los datasets abiertos trimestrales del CENACE.

Ecuador dispone de un parque generador diverso que incluye centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, fotovoltaicas, de biomasa, de biogás y eólicas, pero se desconoce con precisión cuánto varía la producción real de cada tecnología a lo largo del tiempo y ante distintas condiciones estacionales. Esta ausencia de análisis representa un vacío de conocimiento con consecuencias operativas concretas: sin datos sobre la variabilidad tecnológica, resulta imposible diseñar estrategias de respaldo energético eficientes, priorizar inversiones en diversificación de la matriz o anticipar los momentos de mayor vulnerabilidad del sistema ante condiciones climáticas adversas.

Esta investigación busca cerrar ese vacío aplicando un pipeline completo de Big Data y Ciencia de Datos a los datos oficiales del CENACE correspondientes al período enero 2025 – marzo 2026, con el objetivo de caracterizar y comparar la variabilidad de la producción eléctrica entre los distintos tipos de tecnología generadora del SNI. Los resultados obtenidos aportan evidencia cuantitativa basada en datos reales y oficiales que puede orientar la planifica-

2. MÉTODO

La investigación sigue un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo-comparativo, basado en el análisis estadístico de datos secundarios oficiales. El diseño metodológico corresponde a un pipeline de Ciencia de Datos estructurado en cuatro fases secuenciales: adquisición de datos, preprocesamiento y limpieza, análisis estadístico de variabilidad y comparación por estación climática. Este enfoque es consistente con los pipelines de analítica energética descritos por Santos-Dominguez et al. [3] y permite garantizar la trazabilidad y reproducibilidad de cada etapa del proceso analítico.

2.1. FUENTE DE DATOS Y ADQUISICIÓN

Los datos utilizados provienen del portal de Datos Abiertos del Gobierno del Ecuador, administrado por la Secretaría Nacional de Planificación, y publicados por el Operador Nacional de Electricidad CENACE bajo licencia Creative Commons CCZero, que permite su uso, redistribución y análisis sin restricciones para fines de investigación científica [6]. Los datasets corresponden a la energía neta producida por las centrales de generación del Sistema Nacional Interconectado, expresada en Gigavatios-hora (GWh), con desagregación por agente generador, tipo de tecnología, central y unidad generadora para cada mes del período reportado.

Se utilizaron cinco datasets trimestrales en formato CSV que cubren el período enero 2025 – marzo 2026, conformando un total de 15 meses consecutivos de observaciones. Los archivos corresponden a los siguientes períodos: enero-marzo 2025, abril-junio 2025, julio-septiembre 2025, octubre-diciembre 2025 y enero-marzo 2026. Cada archivo contiene entre 387 y 403 filas correspondientes a las unidades generadoras activas en ese trimestre, con variaciones entre períodos que reflejan la incorporación o retiro de unidades del sistema. La unidad de análisis es la producción mensual de cada unidad generadora individual, lo que permite un nivel de desagregación suficiente para identificar patrones de comportamiento tanto a nivel de central como de tipo de tecnología.

2.2. PREPROCESAMIENTO Y LIMPIEZA DE DATOS

Los archivos CSV originales presentaron cuatro tipos de inconsistencias de formato que requirieron tratamiento previo antes del análisis. En primer lugar, los valores numéricos utilizaban coma como separador decimal en lugar de punto, formato habitual en archivos exportados desde Excel en configuración regional de español, lo que impedía su conversión directa a tipo numérico en Python. En segundo lugar, las unidades generadoras sin producción en un mes determinado presentaban el texto "No hubo producción en este periodo" en lugar de un valor numérico cero, lo que generaba columnas de tipo texto heterogéneo. En tercer lugar, algunos valores del dataset de enero-marzo 2026 presentaban un carácter de tabulación como separador entre la parte entera y decimal del número, producto de inconsistencias en el proceso de exportación del sistema fuente. En cuarto lugar, el dataset del segundo trimestre de 2025 contenía una columna adicional vacía sin encabezado, generada por un punto y coma adicional al final de cada línea en el archivo CSV original.

Para resolver estas inconsistencias se desarrolló una función de limpieza en Python denominada `limpiar_valor`, que aplica de forma secuencial los siguientes tratamientos: verificación de valores nulos o vacíos asignándoles el valor cero, detección del texto "No hubo producción" y su reemplazo por cero, identificación de separadores de tabulación y su conversión al formato decimal estándar con punto, y conversión de separadores decimales de coma a punto para el resto de valores. La función aplica manejo de excepciones para garantizar que cualquier valor no reconocido sea tratado como cero en lugar de generar un error que detenga el procesamiento. La columna vacía del segundo trimestre fue eliminada tras verificar mediante inspección directa que no contenía datos válidos en ninguna de sus filas.

Todo el preprocesamiento se realizó en Python 3 utilizando las bibliotecas Pandas versión 2.0 para la manipulación de datos tabulares y NumPy para operaciones numéricas. El entorno de desarrollo utilizado fue Google Colaboratory, que permite la ejecución de código Python en la nube sin requerir instalación local de software, facilitando la reproducibilidad del análisis por parte de otros investigadores.

2.3. CONSTRUCCIÓN DE LA TABLA DE ANÁLISIS UNIFICADA

Tras el preprocesamiento individual de cada dataset trimestral, los cinco archivos fueron transformados de formato ancho, en el que cada mes ocupa una columna separada, a formato largo, en el que cada fila representa la producción de una unidad generadora en un mes específico. Esta transformación se realizó mediante la función `melt` de Pandas y es necesaria para poder aplicar análisis estadísticos que consideren el tiempo como una dimensión de análisis continua.

A cada registro se le asignaron tres variables de contexto adicionales: el trimestre al que pertenece, el año de la observación y la estación climática correspondiente. La tabla unificada resultante contiene 5.886 registros con nueve variables cada uno: agente generador, tipo de tecnología, central, unidad, trimestre, año, estación climática, mes y producción en GWh. Esta estructura permite realizar agrupaciones y comparaciones por cualquier combinación de variables de forma flexible y reproducible.

2.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE VARIABILIDAD

La variabilidad de la producción se cuantificó mediante tres indicadores estadísticos complementarios. La producción total acumulada permite evaluar el peso relativo de cada tecnología en el sistema.

La producción promedio mensual establece el nivel de referencia alrededor del cual oscila la producción de cada tecnología. La desviación estándar cuantifica la dispersión absoluta de la producción respecto a ese promedio.

El indicador principal de esta investigación es el Coeficiente de Variación (CV), definido como la razón entre la desviación estándar y la media de la producción mensual de cada tecnología, expresado en porcentaje según la ecuación (1):

$$CV = (\sigma / \mu) \times 100 \quad (1)$$

donde σ es la desviación estándar de la producción mensual y μ es la media de la producción mensual para cada tipo de tecnología generadora. El CV fue seleccionado como indicador principal porque permite comparar la variabilidad relativa entre tecnologías de escalas de producción muy distintas, superando la limitación de usar la desviación estándar absoluta para comparaciones entre grupos heterogéneos [8]. Una tecnología con CV alto presenta producción más impredecible e inestable en relación a su propio nivel promedio, independientemente de si ese nivel es alto o bajo en términos absolutos.

Se estableció adicionalmente un umbral de relevancia operativa de 1 GWh de producción promedio mensual para diferenciar las unidades generadoras activas de los grupos electrógenos de emergencia y microcentrales con producción insignificante.

Este criterio permitió construir dos conjuntos de análisis: el conjunto completo con 5.886 registros que incluye todas las unidades del SNI, y el conjunto de unidades relevantes con 2.703 registros que excluye las unidades con aporte marginal al sistema. Ambos conjuntos se analizan y reportan para permitir la comparación y verificar la robustez de los resultados.

2.5. CLASIFICACIÓN ESTACIONAL

Los 15 meses analizados se clasificaron en tres estaciones climáticas según el régimen hidrológico típico del Ecuador continental. La estación húmeda comprende los meses de enero a marzo, período caracterizado por mayores precipitaciones en la Sierra y Costa ecuatoriana, e incluye los trimestres enero-marzo 2025 y enero-marzo 2026, sumando seis meses de observación. La estación seca comprende los meses de julio a diciembre, período de menor pluviosidad que coincide con el verano de la Sierra y el verano costero, e incluye los trimestres julio-septiembre 2025 y octubre-diciembre 2025, sumando seis meses de observación. El período de transición comprende los meses de abril a junio 2025, que corresponde al cambio gradual entre la época húmeda y la seca, y se analiza como categoría separada para no distorsionar la comparación entre las dos estaciones principales.

Esta clasificación en tres categorías es más precisa que una comparación binaria seca-húmeda y permite identificar patrones de comportamiento diferenciados durante el período de cambio estacional, que tiene características propias en términos de producción hidroeléctrica y demanda energética. La clasificación es consistente con la definición de estaciones climáticas del Ecuador utilizada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI en sus reportes oficiales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis estadístico de los 5.886 registros mensuales de producción del SNI durante el período enero 2025 – marzo 2026 permitió caracterizar el comportamiento productivo de seis tipos de tecnología generadora y evaluar su variabilidad relativa mediante el Coeficiente de Variación. El dataset procesado cubre 15 meses consecutivos distribuidos en cinco trimestres oficiales del CENACE, integrando información de 393 a 403 unidades generadoras por trimestre, lo que representa la totalidad del parque generador conectado al SNI en ese período.

3.1. COMPOSICIÓN DEL PARQUE GENERADOR DEL SNI

Antes de analizar la variabilidad, es necesario comprender la composición del parque generador. El SNI integra seis tipos de tecnología con características operativas fundamentalmente distintas. La tecnología hidroeléctrica concentra la mayor cantidad de unidades relevantes con 1.851 registros en el conjunto filtrado, reflejando su posición dominante en el sistema. La tecnología térmica sigue con 717 registros de unidades relevantes, aunque su universo total incluye 184 unidades entre las cuales 125 corresponden a grupos electrógenos de emergencia con producción promedio inferior a 1 GWh mensual.

Este hallazgo es en sí mismo relevante: el 68% de las unidades térmicas registradas en el SNI son equipos de respaldo que operan de forma esporádica o no operan en absoluto durante períodos normales del sistema.

La fotovoltaica cuenta con 144 registros totales pero ninguna unidad individual supera 1 GWh de promedio mensual, reflejando la escala reducida de las instalaciones solares actuales en Ecuador. La biomasa, el biogás y la eólica tienen presencia más limitada en número de unidades pero con comportamientos operativos diferenciados que resultan significativos para la planificación energética.

3.2. VARIABILIDAD GENERAL POR TIPO DE TECNOLOGÍA

La Tabla 1 presenta los indicadores estadísticos de variabilidad para el conjunto completo de unidades generadoras del SNI durante los 15 meses analizados.

TABLA.I.

Variabilidad de la producción por tipo de tecnología generadora (enero 2025 – marzo 2026)

Tecnología	Producción Total (GWh)	Promedio Mensual (GWh)	Desv. Estándar	CV (%)
Térmica (T)	7.113,67	2,70	9,16	338,77
Biomasa (BMAS)	221,98	3,70	6,88	186,09
Hidroeléctrica (H)	34.647,56	12,88	23,41	181,78
Eólica (ELCA)	213,80	2,85	1,70	59,53
Fotovoltaica (FVOL)	39,92	0,11	0,06	50,32
Biogás (BGAS)	55,09	0,92	0,32	35,24

Nota: elaboración propia a partir de datos oficiales del CENACE [6].

La hidroeléctrica es la tecnología dominante con 34.647 GWh, representando el 81,3% de la producción total del sistema durante los 15 meses analizados. Este porcentaje confirma cuantitativamente con datos reales la dependencia estructural documentada por Chamorro et al. [1], quienes señalaron que Ecuador ha operado históricamente con entre el 75% y el 85% de su generación proveniente de fuentes hídricas. La térmica aporta el 16,7% restante de la producción significativa, mientras que todas las tecnologías renovables no convencionales juntas (eólica, fotovoltaica, biomasa y biogás) representan apenas el 1,2% de la producción total del período analizado, evidenciando el escaso nivel de diversificación real de la matriz energética ecuatoriana más allá de la hidroelectricidad.

La hidroeléctrica es la tecnología dominante con 34.647 GWh, representando el 81,3% de la producción total del sistema durante los 15 meses analizados. Este porcentaje confirma cuantitativamente con datos reales la dependencia estructural documentada por Chamorro et al. [1], quienes señalaron que Ecuador ha operado históricamente con entre el 75% y el 85% de su generación proveniente de fuentes hídricas. La térmica aporta el 16,7% restante de la producción significativa, mientras que todas las tecnologías renovables no convencionales juntas (eólica, fotovoltaica, biomasa

y biogás) representan apenas el 1,2% de la producción total del período analizado, evidenciando el escaso nivel de diversificación real de la matriz energética ecuatoriana más allá de la hidroelectricidad.

3.3. VARIABILIDAD DE UNIDADES OPERATIVAMENTE RELEVANTES

Para obtener una comparación más representativa del comportamiento real del sistema, la Tabla 2 presenta los resultados filtrados para unidades con producción promedio mensual igual o superior a 1 GWh. Este umbral permite separar las centrales que operan de forma continua y significativa de los equipos de emergencia y microcentrales con aporte marginal al sistema.

TABLA.II.

Variabilidad de unidades generadoras relevantes (promedio ≥ 1 GWh mensual)

Tecnología	Producción Total (GWh)	Promedio Mensual (GWh)	Desv. Estándar	CV (%)
Térmica (T)	6.850,37	9,55	15,59	163,17
Biomasa (BMAS)	212,64	4,73	7,68	162,56
Hidroeléctrica (H)	34.438,44	18,61	7,68	141,31
Eólica (ELCA)	213,80	2,85	1,70	59,53
Biogás (BGAS)	17,36	1,16	0,51	44,17

Nota: elaboración propia a partir de datos oficiales del CENACE [6].

Al aplicar el filtro de relevancia operativa, la jerarquía de variabilidad se mantiene estable y consistente. La térmica y la biomasa presentan los CV más altos con 163,17% y 162,56% respectivamente, seguidas de la hidroeléctrica con 141,31%. La eólica con 59,53% y el biogás con 44,17% son las tecnologías más estables del sistema. Esta jerarquía es robusta porque no cambia al controlar el efecto de las unidades inactivas, lo que confirma que refleja un patrón estructural real del comportamiento de cada tecnología y no un artefacto estadístico del procesamiento de datos.

Este resultado contradice la percepción común de que las energías renovables variables como la eólica y la solar son las más impredecibles del sistema. En el contexto específico del SNI ecuatoriano durante el período analizado, son precisamente las tecnologías renovables no convencionales las que presentan mayor estabilidad relativa, mientras que la hidroeléctrica y la térmica, consideradas tecnologías de base, exhiben la mayor variabilidad. Esta aparente paradoja se explica por la escala y la naturaleza de las fluctuaciones: las grandes hidroeléctricas de embalse como Coca Codo Sinclair, Paute y Sopladora pueden variar su producción mensual en decenas de GWh según las decisiones de despacho y las condiciones hidrológicas, generando una dispersión absoluta enorme que se traduce en un CV alto incluso cuando se mide en términos relativos.

La unidad con mayor producción promedio mensual del sistema es Coca Codo Sinclair U4 con 92,53 GWh, mientras que en el extremo opuesto se encuentran decenas de grupos electrógenos municipales e industriales con producción promedio inferior a 0,1 GWh mensual.

Esta heterogeneidad de escala dentro del mismo sistema es en sí misma un hallazgo relevante para la planificación operativa del CENACE, ya que implica que los análisis agregados por tecnología pueden ocultar comportamientos muy distintos entre unidades de la misma categoría.

Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Alazemi et al. [5], quienes señalaron que la variabilidad en sistemas eléctricos con alta participación hidroeléctrica no proviene principalmente de las fuentes renovables variables sino de la dependencia de un recurso hídrico estocástico de gran escala. En el caso ecuatoriano, esta dependencia se amplifica por la concentración de la generación en pocas grandes centrales, lo que hace que las variaciones de cada una de ellas tengan un impacto significativo en el comportamiento agregado del sistema.

3.4. IMPACTO DE LA ESTACIONALIDAD CLIMÁTICA

La Tabla 3 presenta la producción total acumulada de cada tecnología según la estación climática, permitiendo evaluar el impacto del régimen hidrológico en el comportamiento productivo del SNI.

TABLA.III.

Producción total por tecnología y estación climática (GWh)

Tecnología	Húmeda	Seca	Transición
Hidroeléctrica (H)	13.286,75	13.921,20	7.439,61
Térmica (T)	3.699,49	2.357,60	1.056,58
Eólica (ELCA)	61,67	109,33	42,80
Biogás (BGAS)	23,73	21,67	9,70
Fotovoltaica (FVOL)	16,46	15,93	7,53
Biomasa (BMAS)	0,58	220,40	1,00

Nota: elaboración propia a partir de datos oficiales del CENACE [6].

El análisis estacional revela patrones de comportamiento diferenciados entre tecnologías que tienen implicaciones directas para la planificación de la seguridad energética del sistema. La hidroeléctrica produce ligeramente más en estación seca (13.921 GWh) que en húmeda (13.286 GWh), una diferencia del 4,8% que puede explicarse por la capacidad de regulación de los embalses principales. Las centrales de embalse como Mazar, Paute y Sopladora acumulan agua durante la época lluviosa y la liberan de forma controlada durante la seca, desacoplando parcialmente su producción del régimen de precipitaciones inmediato. Este comportamiento regulado contrasta con el de las centrales hidroeléctricas de pasada, que sí dependen directamente del caudal instantáneo del río y son más vulnerables a períodos de estiaje prolongado.

En respuesta al comportamiento de la hidroeléctrica, la térmica actúa como tecnología de respaldo compensatorio aumentando significativamente su producción en época húmeda (3.699 GWh) respecto a la seca (2.357 GWh), un incremento del 57%. Este patrón de compensación térmica ante variaciones de la generación hídrica es consistente con lo documentado por Chamorro et al. [1] y tiene implicaciones económicas y ambientales importantes: los

períodos de mayor generación térmica implican mayor consumo de combustibles fósiles, mayores emisiones de CO₂ y mayores costos operativos para el sistema, factores que justifican la inversión en tecnologías de respaldo más limpias y estables.

El hallazgo más relevante e inesperado de este análisis corresponde a la biomasa, que registra una caída de producción del 99,7% entre la estación seca (220,40 GWh) y la húmeda (0,58 GWh). Este comportamiento no responde a factores climáticos sino a la estacionalidad agroindustrial de la zafra azucarera ecuatoriana, período durante el cual las centrales de biomasa como San Carlos y Ecoelectric operan utilizando bagazo de caña como combustible. Fuera de la temporada de zafra, estas centrales cesan prácticamente toda su producción por falta de combustible disponible. Este hallazgo constituye un aporte original de esta investigación ya que documenta cuantitativamente por primera vez esta dependencia productiva usando datos oficiales del CENACE, y tiene implicaciones prácticas para la planificación del sistema: la biomasa no puede considerarse una fuente de respaldo energético confiable durante los meses de enero a junio, precisamente el período en que la generación hidroeléctrica podría estar bajo mayor presión climática.

La eólica presenta mayor producción en estación seca (109,33 GWh) que en húmeda (61,67 GWh), una diferencia del 77,3% que es consistente con los patrones de viento predominantes en las zonas de emplazamiento de las centrales Villonaco en Loja y Huascachaca en Azuay, donde los vientos son más intensos y sostenidos durante los meses secos. Este comportamiento es complementario al de la hidroeléctrica en términos estacionales: cuando la hidro tiende a reducir su producción en seca, la eólica tiende a aumentar la suya, lo que sugiere un potencial de complementariedad que podría ser aprovechado en la planificación de la diversificación de la matriz energética ecuatoriana.

El biogás y la fotovoltaica muestran variaciones menores entre estaciones, con diferencias inferiores al 10% entre estación húmeda y seca. Esta estabilidad relativa confirma su comportamiento como fuentes de generación predecibles independientemente del régimen climático, aunque su aporte actual al sistema es marginal en términos absolutos. La fotovoltaica en particular muestra un potencial de crecimiento significativo considerando que Ecuador tiene una irradiación solar promedio de 4,5 a 5,5 kWh/m²/día según el Atlas Solar del Ecuador, muy superior a la de muchos países con mayor penetración solar en su matriz energética.

3.5. IMPLICACIONES PARA LA PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Los resultados obtenidos tienen implicaciones concretas para la planificación energética del Ecuador que van más allá del análisis descriptivo. En primer lugar, la confirmación cuantitativa de que la eólica y el biogás son las tecnologías más estables del sistema, combinada con la identificación de la complementariedad estacional entre eólica e hidroeléctrica, proporciona argumentos basados en datos para priorizar la expansión de estas tecnologías como estrategia de reducción del riesgo sistémico. En segundo lugar, la documentación del rol compensatorio de la térmica y su costo ambiental y económico asociado refuerza la urgencia de desarrollar alternativas de respaldo más limpias.

En tercer lugar, la identificación de que el 68% de las unidades térmicas registradas en el SNI son grupos electrógenos de emergencia casi inactivos sugiere que existe una capacidad instalada subutilizada que podría ser evaluada para su reemplazo o reconversión.

Estos hallazgos son coherentes con las recomendaciones del estudio de Sterl et al. [2], que señaló que Ecuador podría reducir significativamente el riesgo de apagones mediante la incorporación sostenida de energías eólica y solar, y con el trabajo de Santos-Dominguez et al. [3], que demostró que el análisis de datos de operadores nacionales de electricidad puede producir insumos directamente utilizables para la toma de decisiones en planificación energética.

4. CONCLUSIONES

El análisis de la variabilidad de la producción eléctrica en el Sistema Nacional Interconectado del Ecuador durante el período enero 2025 – marzo 2026, mediante un pipeline de Big Data y Ciencia de Datos aplicado a 5.886 registros oficiales del CENACE, permitió obtener las siguientes conclusiones, organizadas según los objetivos específicos planteados en esta investigación.

En relación con la caracterización del comportamiento productivo por tecnología, la hidroeléctrica continúa siendo la tecnología dominante del SNI con el 81,3% de la producción total acumulada en 15 meses (34.647 GWh), confirmando cuantitativamente con datos reales la dependencia estructural que caracteriza la matriz energética ecuatoriana y que ha sido documentada de forma descriptiva en estudios previos. Sin embargo, su Coeficiente de Variación de 141,31% en unidades operativamente relevantes evidencia una variabilidad relativa alta que representa un riesgo concreto y medible para la seguridad energética del sistema, especialmente ante condiciones climáticas adversas como las registradas durante la crisis de 2023-2024.

En relación con la comparación entre tecnologías renovables y no renovables, los resultados revelan un hallazgo que contradice la percepción convencional: la eólica y el biogás, ambas tecnologías renovables no convencionales, son las más estables del sistema con Coeficientes de Variación de 59,53% y 44,17% respectivamente, muy por debajo de la hidroeléctrica y la térmica. Este resultado sugiere que la diversificación de la matriz energética hacia estas tecnologías no solo tiene un argumento ambiental sino también un argumento de estabilidad operativa, ya que su producción es más predecible y confiable mes a mes, reduciendo la vulnerabilidad del sistema ante variaciones climáticas. Esta conclusión es relevante para orientar las decisiones de inversión del Estado ecuatoriano en proyectos de generación renovable, priorizando aquellas tecnologías que combinan beneficio ambiental con estabilidad productiva.

En relación con la identificación de centrales con inactividad persistente, el análisis reveló que el 68% de las unidades clasificadas como tecnología térmica en el registro del CENACE corresponden a grupos electrógenos de emergencia con producción promedio inferior a 1 GWh mensual, varios de ellos con producción nula durante todo el período analizado. Esta identificación constituye un aporte práctico directo para el CENACE, ya que señala la existencia

de capacidad instalada subutilizada que podría ser evaluada para su reconversión, mantenimiento o eventual retiro del registro operativo, optimizando así la gestión del parque generador nacional.

En relación con el impacto de la estacionalidad climática, se confirmó que la térmica actúa como tecnología de respaldo compensatorio del sistema, aumentando su producción en un 57% durante la estación húmeda respecto a la seca, lo que implica mayor consumo de combustibles fósiles, mayores emisiones de carbono y costos operativos más altos en esos periodos. Asimismo, se documentó por primera vez con datos oficiales del CENACE que la biomasa registra una caída de producción del 99,7% entre la estación seca y la húmeda, determinada por la estacionalidad de la zafra azucarera y no por factores climáticos, lo que implica que esta tecnología no puede considerarse una fuente de respaldo confiable durante los meses de enero a junio. Por su parte, se identificó un patrón de complementariedad estacional entre la eólica y la hidroeléctrica, ya que la primera incrementa su producción en estación seca cuando la segunda tiende a reducirla, lo que sugiere un potencial de aprovechamiento conjunto en la planificación de la diversificación energética.

En relación con las recomendaciones de planificación energética derivadas de este análisis, se proponen tres líneas de acción concretas. Primero, priorizar la expansión de capacidad eólica y de biogás como estrategia de diversificación que reduce simultáneamente el riesgo climático y las emisiones de carbono del sistema, aprovechando además la complementariedad estacional identificada entre la eólica y la hidroeléctrica. Segundo, evaluar la capacidad térmica de emergencia actualmente subutilizada para determinar su viabilidad de reconversión hacia tecnologías más limpias o su racionalización dentro del parque generador nacional. Tercero, incorporar el factor de estacionalidad agroindustrial de la biomasa en los modelos de planificación operativa del CENACE, reconociendo que esta tecnología no constituye un respaldo confiable durante el primer semestre del año.

Desde el punto de vista metodológico, la aplicación de un pipeline de Ciencia de Datos sobre datos abiertos del CENACE demostró ser viable, reproducible y escalable para el análisis del sistema eléctrico ecuatoriano. La metodología desarrollada, que incluye funciones de limpieza específicamente adaptadas a las inconsistencias de formato identificadas en los datasets oficiales, puede aplicarse a futuros periodos trimestrales conforme el CENACE publique nuevos datos, permitiendo el monitoreo continuo de la variabilidad productiva del SNI sin costos adicionales de adquisición de datos. Esta reproducibilidad constituye un aporte metodológico significativo para futuras investigaciones en el campo de la analítica energética aplicada a sistemas eléctricos latinoamericanos.

Como limitación principal de este estudio, el período analizado de 15 meses no captura ciclos hidrológicos completos de múltiples años ni eventos climáticos extremos como El Niño o La Niña, por lo que los patrones estacionales identificados deben interpretarse como indicativos del comportamiento reciente del sistema y no como patrones definitivos o representativos de todas las condiciones climáticas posibles. Se recomienda como línea de investigación futura replicar este análisis con series históricas de mayor duración, idealmente de cinco años o más, para validar la persis-

tencia de los patrones identificados y evaluar su comportamiento durante episodios de estrés hídrico severo similares al experimentado durante la crisis de 2023-2024.

REFERENCIAS

- [1] J. Chamorro y E. Mera, "Estudio de la crisis energética en el Ecuador por la dependencia en la generación de energía hidráulica," *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, vol. 8, no. 15, pp. 168-186, 2025. ISSN: 2737-6249.
- [2] S. Sterl, I. Pineda, J. Mast, J. Rodriguez, J. Muñoz y W. Thiery, "Variable renewables fortify Ecuador's power system against recurrences of drought-driven energy crises," *Nature Water*, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s44221-026-00617-w>
- [3] M. Santos-Dominguez, N. Hernandez Flores, I. A. Parra-Ramirez y G. Arroyo-Figueroa, "AI-Big Data Analytics Platform for Energy Forecasting in Modern Power Systems," *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 9, no. 11, p. 272, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/bdcc9110272>
- [4] A. D. Mullo, J. M. Reinoso, M. S. Chamba y C. X. Lozada, "Análisis y Caracterización de la Calidad de Energía utilizando Minería de Datos," *Revista Técnica Energía*, vol. 22, no. 1, pp. 33-45, 2025. ISSN: 2602-8492. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v22.n1.2025.702>
- [5] T. Alazemi, M. Darwish y M. Radi, "Renewable energy sources integration via machine learning modelling: A systematic literature review," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, p. e26088, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26088>
- [6] CENACE, "Datasets de Producción de Energía Eléctrica del SNI," Portal de Datos Abiertos del Gobierno del Ecuador, 2025-2026. Licencia Creative Commons CCZero. [Online]. Available: <https://www.datosabiertos.gob.ec>
- [7] W. McKinney, *Python for Data Analysis*, 3ra ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2022.
- [8] N. E. Benti, M. D. Chaka y A. G. Semie, "Forecasting Renewable Energy Generation with Machine Learning and Deep Learning: Current Advances and Future Prospects," *Sustainability*, vol. 15, no. 9, p. 7087, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su15097087>



REVISTA INGENIO

Evaluación patológica del puente concordia (bolivia) mediante ensayos no destructivos; inviabilidad técnica y recomendación de demolición

Pathological evaluation of the Concordia Bridge (Bolivia) by means of non-destructive test: Technical infeasibility and demolition recommendation

Sidney Salvatierra Quiroga | Universidad Privada del Valle / Dpto. de Ingeniería Civil

Graciela Gorená Espada | Universidad Privada del Valle / Dpto. de Ingeniería Civil

Roger Joel Ríos Gonzales | Universidad Privada del Valle / Dpto. de Ingeniería Civil

Jhoselyn Claros Román | Universidad Privada del Valle / Dpto. de Ingeniería Civil

Recibido: 29/04/2026

Recibido tras revisión: 29/06/2026

Aceptado: 15/07/2026

Publicado: 31/07/2026

PALABRAS CLAVE

Evaluación patológica, ensayos no destructivos, puentes de hormigón, obra paralizada, demolición estructural

KEY WORDS

Pathological evaluation, non-destructive testing, concrete bridges, paralyzed construction site, structural demolition

RESUMEN

La paralización prolongada de obras de infraestructura vial en Latinoamérica genera condiciones de deterioro acelerado que comprometen la seguridad estructural y la viabilidad técnica de su reactivación. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la condición patológica del Puente Concordia (Quillacollo, Bolivia), una obra paralizada desde 2018, para determinar la factibilidad de su rehabilitación o demolición. Se empleó una metodología mixta (cualitativa-cuantitativa) de nivel descriptivo-diagnóstico, aplicando ensayos no destructivos (END) basados en normas internacionales: esclerometría (ASTM C805-18), pachometría, fisurometría (ACI 224R-01) y nivelación láser (ISO 17123-3), complementados con inspección visual, verificación geométrica y modelación estructural en CSI Bridge v.24.0 bajo AASHTO LRFD 2020. Los resultados evidenciaron carbonatación generalizada en toda la superestructura, recubrimientos de armaduras hasta 10 mm por debajo del mínimo normativo, fisuras (0,05-0,60 mm) y grietas de hasta 3 mm en vigas cabezal, así como asentamientos diferenciales de 31 mm entre pilas con rotación de 18 mm en el cabezal izquierdo. Si bien la esclerometría indicó resistencias superficiales elevadas (328-570 kg/cm²), estas se encuentran mayoradas por la carbonatación y no reflejan la integridad interna. Las discrepancias geométricas entre el diseño y lo ejecutado generaron pérdidas de rigidez del 20-30% en vigas. Se concluye que la superestructura del Puente Concordia presenta un deterioro irreversible que la hace técnicamente inviable para cualquier intervención de rehabilitación, por lo que se recomienda su demolición total y reconstrucción. Este caso evidencia la necesidad de implementar protocolos obligatorios de inspección periódica para obras paralizadas en contextos latinoamericanos.

ABSTRACT

The prolonged stoppage of road infrastructure works in Latin America generates conditions of accelerated deterioration that compromise structural safety and the technical feasibility of its reactivation. The objective of this study was to evaluate the pathological condition of the Concordia Bridge (Quillacollo, Bolivia), a work paralyzed since 2018, to determine the feasibility of its rehabilitation or demolition. A mixed methodology (qualitative-quantitative) of descriptive-diagnostic level was used, applying non-destructive testing (NDT) based on international standards: sclerometry (ASTM C805-18), pachometry, fisurometry (ACI 224R-01) and laser leveling (ISO 17123-3), complemented with visual inspection, geometric verification and structural modeling in CSI Bridge v.24.0 under AASHTO LRFD 2020. The results showed widespread carbonation throughout the superstructure, reinforcement coatings up to 10 mm below the normative minimum, cracks (0.05-0.60 mm) and cracks of up to 3 mm in head beams, as well as differential settlements of 31 mm between piers with rotation of 18 mm in the left head. Although sclerometry indicated high surface resistances (328-570 kg/cm²), these are higher due to carbonation and do not reflect internal integrity. The geometric discrepancies between the design and the execution generated rigidity losses of 20-30% in beams. It is concluded that the superstructure of the Concordia Bridge presents an irreversible deterioration that makes it technically unfeasible for any rehabilitation intervention, so its total demolition and reconstruction is recommended. This case shows the need to implement mandatory periodic inspection protocols for paralyzed works in Latin American contexts.

1. INTRODUCCION

Los puentes constituyen elementos fundamentales en la infraestructura vial. La supervisión y el mantenimiento resultan determinantes para preservar su comportamiento estructural a lo largo de su vida útil [1], [2]. La ausencia de un mantenimiento planificado, sumada a la exposición ambiental agresiva, genera deterioros progresivos e irreversibles.

A nivel internacional, diversos informes han identificado que patologías como la corrosión de armaduras, la delaminación del concreto, la fisuración por cargas repetidas, la fatiga en conexiones metálicas y las pérdidas de recubrimiento representan las principales causas de disminución de la capacidad resistente y funcionalidad en puentes carreteros [1]–[3], [12], [21]. Estudios realizados en Norteamérica y Europa indican que más del 40% de los puentes en servicio presentan algún nivel de deterioro significativo, destacando casos emblemáticos como el colapso del puente I-35W en Estados Unidos (2007) y el del Ponte Morandi en Italia (2018), donde fallas acumulativas no detectadas oportunamente derivaron en colapsos con severas consecuencias [4], [5].

En Latinoamérica, investigaciones recientes han documentado problemáticas asociadas a corrosión acelerada por ambientes agresivos, fallas por socavación, segregación del concreto y fisuración por efectos térmicos [6], [7], [9]. Estas patologías subrayan la necesidad de implementar planes de mantenimiento adaptados a las condiciones locales [8].

En los últimos años, los ensayos no destructivos (END) se han constituido como herramientas prácticas para la inspección de estructuras existentes, permitiendo obtener información del material sin afectar su integridad [8], [15], [16].

En Bolivia, el mantenimiento inadecuado ha sido evidenciado en casos como el colapso del puente de la avenida 6 de Agosto en Cochabamba (2014), ocurrido diez meses después de su inauguración [3]. Asimismo, estructuras como los puentes Antezana, Cala Cala y Huayculi han mostrado deterioros prematuros relacionados con corrosión y desprendimientos de recubrimiento [4].

Un escenario particularmente crítico en Bolivia, y menos documentado, es el de las obras paralizadas. La suspensión prolongada de la construcción expone a las estructuras a condiciones ambientales severas sin las protecciones propias de una obra en servicio o en ejecución activa, generando incertidumbre sobre su viabilidad técnica [6], [7], [9].

En este contexto, el Puente Concordia, ubicado sobre el río Rocha en el municipio de Quillacollo (Cochabamba, Bolivia), constituye un caso de estudio relevante. Concebido para vincular los distritos 3 y 6 y mejorar el acceso a la Terminal Interdepartamental de Buses, la obra quedó paralizada en 2018 [5]. La suspensión prolongada, sumada a la exposición ambiental durante aproximadamente ocho años, ha

generado incertidumbre sobre la viabilidad técnica y funcional de la estructura. En contextos similares, como puentes rurales y urbanos en regiones andinas y subtropicales, se ha observado que la ausencia de protección superficial acelera los procesos de degradación, requiriendo evaluaciones integrales que incluyan la identificación temprana de fisuras y grietas [13], [21], [22].

La acumulación de estas evidencias subraya la importancia de emplear metodologías integrales de diagnóstico que combinen la inspección visual, los ensayos no destructivos, la verificación geométrica y la modelación estructural. Estas técnicas permiten caracterizar objetivamente la condición real de las estructuras y determinar si su reactivación, mantenimiento o reparación pueden ejecutarse bajo parámetros de seguridad adecuados [10], [14], [16], [23].

Ante esta situación, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la condición patológica del Puente Concordia mediante la aplicación de ensayos no destructivos, con el fin de caracterizar su estado actual e identificar patologías que afecten su integridad estructural. Los resultados buscan aportar elementos técnicos que orienten la toma de decisiones por parte de autoridades municipales, contribuyendo a definir si la rehabilitación es factible o si el deterioro la convierte en un proyecto estructuralmente inviable, contribuyendo a propuestas metodológicas adaptadas a la realidad regional [11], [17], [24].

2. Método

La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto (cualitativo-cuantitativo), con un nivel descriptivo-diagnóstico y un diseño no experimental transversal. La evaluación abarcó el 100% de los elementos estructurales ejecutados a nivel de superestructura del Puente Concordia hasta la fecha de su abandono (2018) como se observa en la Fig. 1. El trabajo se estructuró en cuatro etapas secuenciales: (1) recopilación documental, (2) inspección visual y verificación geométrica, (3) ensayos no destructivos (END) y (4) verificación estructural analítica.



Fig. 1. Vista del puente Concordia abandonado

Nota: Elaboración propia (2025)

2.1 Material

2.1.1 Objeto de estudio

El Puente Concordia se ubica sobre el río Rocha, en el municipio de Quillacollo, departamento de Cochabamba (Bolivia). La estructura fue concebida como un puente vehicular de dos carriles, con una longitud total aproximada de 45 m, compuesto por:

- **Superestructura:** Seis vigas AASHTO-PCI tipo III pretensadas (longitud ≈ 22 m), loseta de hormigón armado (espesor 0,20 m), diafragmas intermedios y vigas cabezal.
- **Subestructura:** Dos estribos laterales y dos pilas centrales circulares de hormigón armado.

La obra se encontraba paralizada desde 2018, sin haber recibido mantenimiento ni protección durante el periodo de exposición (aproximadamente 8 años al momento de la evaluación).

2.1.2 Equipos e instrumentos

Como se puede observar en la Tabla I, los ensayos no destructivos fueron ejecutados conforme normativa internacional y con equipos e instrumentos de reconocida marca, detallando sus especificaciones.

TABLA I. EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN

Ensayo	Equipo	Especificaciones	Norma de referencia
Esclerometría	Esclerómetro digital	Rango: 10-100 N/mm ² , calibración previa	ASTM C805-18
Pachometría	IWIN-R800 Integrated Rebar Scanner	Precisión: ± 1 mm, detección de $\varnothing$ 6-40 mm	Procedimiento interno validado
Fisurimetría	Tarjeta graduada	Rango: 0,1 - 5,0 mm, resolución 0,05 mm	ACI 224R-01
Nivelación láser	Nivel láser rotativo Leica Rugby 840 + receptor Rod Eye 180 RF	Precisión: $\pm 1,5$ mm a 30 m, autonivelación	ISO 17123-3:2001
Verificación geométrica	Cinta métrica (50 m) + distanciómetro digital	Precisión: $\pm 0,1$ mm	Procedimiento interno

2.1.3 Software de modelación estructural

- CSI Bridge v.24.0 para modelación tridimensional de elementos finitos.
- Mathcad Prime 9.0 para recálculo manual independiente.
- Sketchup para modelado geométrico tridimensional de la estructura existente.

2.1.4 Normativa de diseño y verificación

- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 8va edición (2017) -normativa original de diseño.
- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9na edición (2020) -para verificación actualizada-[20].

2.2 Configuración

2.2.1 Puntos de muestreo

Los ensayos no destructivos se distribuyeron sistemáticamente en toda la superestructura, considerando:

- Esclerometría: 482 impactos distribuidos en 6 vigas ($L/3$ de la luz, ambas caras), 5 diafragmas, 2 estribos y 2 vigas cabezal. Se respetó una distancia mínima de 5 cm de los bordes y se evitó la incidencia directa sobre armaduras (previa localización con

pachómetro).

- Pachometría: 126 mediciones directas en zonas coincidentes con la esclerometría, cubriendo vigas, diafragmas y vigas cabezal.
- Fisurimetría: 18 elementos evaluados (vigas, diafragmas, losetas y vigas cabezal), con identificación de fisuras mayores y medición en puntos críticos.
- Nivelación láser: 30 puntos de control distribuidos a lo largo de las vigas principales y vigas cabezal, con coordenadas exactas para reconstrucción del perfil deformado.

2.2.2 Condiciones ambientales durante los ensayos

Los ensayos se realizaron en condiciones diurnas (08:00 - 16:00), con temperatura ambiente entre 18°C y 26°C, humedad relativa promedio del 45% y ausencia de precipitaciones. La superficie del hormigón se encontró seca y libre de humedad superficial al momento de cada ensayo.

2.3 Procedimiento experimental

2.3.1 Recopilación documental

La información técnica del proyecto (planos estructurales, especificaciones técnicas, Documento Base de Contratación - DBC y resolución de contrato) se obtuvo del Sistema de Contrataciones del Estado (SI-COES) de Bolivia [18], mediante el Código Único de Contratación del Estado (CUCE): N° 14-0163-00-456789. Esta documentación sirvió como base para la verificación geométrica y estructural posterior.

2.3.2 Inspección visual y verificación geométrica

Se realizó una inspección visual sistemática de todos los elementos de la superestructura siguiendo la metodología propuesta por Porto [19], elaborando fichas de diagnóstico individuales para cada elemento estructural (código, patología identificada, fotografía, croquis de ubicación, descripción, posibles causas y forma de intervención sugerida). Paralelamente, se ejecutó la verificación geométrica mediante 126 mediciones directas con cinta métrica y distanciómetro digital ($\pm 0,1$ mm), cubriendo vigas, losetas, diafragmas y pilas. Las desviaciones dimensionales registradas (± 3 mm) no resultaron significativas para el cálculo estructural. Los datos obtenidos se introdujeron a un modelo tridimensional desarrollado en SketchUp (Fig. 2).



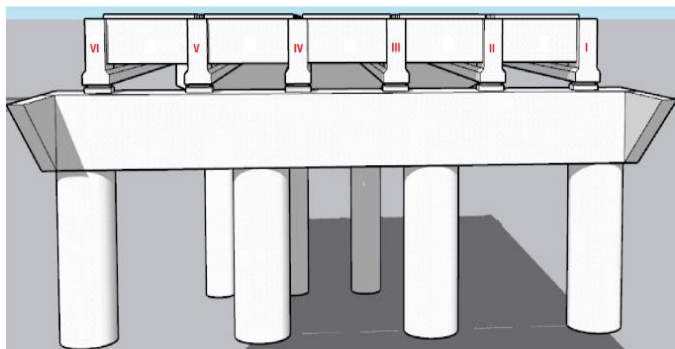


Fig. 2. Modelado del puente: a) Situación real, b) Puente graficado en SketchUp

Nota: Elaboración propia (2025)

2.3.3 Ensayos no destructivos (END)

2.3.3.1 Esclerometría (ASTM C805-18)

Previo al ensayo, se limpió la superficie del hormigón mediante una piedra abrasiva para eliminar la capa de carbonatación superficial. Se delimitó una cuadrícula de 15×15 cm, subdividida en celdas de 25×25 mm. Como se observa en la Fig. 3, se realizaron 9 impactos válidos por punto de ensayo, descartando aquellos con diferencia > 6 unidades respecto al promedio. Los valores de rebote se convirtieron a resistencia a la compresión superficial (kg/cm^2) mediante curvas de correlación específicas para hormigón de alta resistencia.



Fig. 3. Ensayo de esclerometría ASTM C805-18

Nota: Elaboración propia (2025)

2.3.3.2 Pachometría

Se aplicó el ensayo de Pachometría mediante el equipo IWIN-R800 (Integrated Rebar Scanner) en los elementos estructurales donde se realizó el ensayo de esclerometría a fin de determinar la ubicación de los refuerzos estructurales, además se pudo obtener el diámetro de las barras, espaciamiento entre barras y profundidad de recubrimiento.

En la Fig. 4 se observa que, dentro del procedimiento establecido, se determinó en primera instancia la ubicación de los aceros de refuerzo longitudinal, posteriormente se determinó la ubicación

de los refuerzos transversales (estribos).

El ensayo de Pachometría también permitió validar la información en los planos de diseño en cuanto a ubicación de los refuerzos de acero y su diámetro.



Fig. 4. Aplicación del pachómetro en viga postensada

Nota: Elaboración propia (2025)

2.3.3.3 Fisurimetría (ACI 224R-01)

Se identificaron visualmente los sectores con presencia de fisuras y/o grietas. Se utilizó una tarjeta graduada (0,1 - 5,0 mm) colocada perpendicularmente a la dirección de la fisura para medir el ancho máximo como se ve el detalle de la Fig. 5. Las fisuras se clasificaron según ACI 224R-01 en:

- Fisuras: ancho < 1 mm.
- Grietas: ancho ≥ 1 mm.



Fig. 5. Identificación de ancho de la fisura en loseta

Nota: Elaboración propia (2025)

Se registró la longitud, orientación y ubicación de cada fisura, asociándolas a posibles mecanismos de generación (térmicos, por retracción, estructurales, etc.).

2.3.3.4 Nivelación láser (ISO 17123-3:2001)

Para poder determinar las deformaciones presentes y asentamientos diferenciales en la superestructura del puente se empleó una nivelación láser rotativo conforme la ISO 17123-3:2001. El equipo utilizado fue un nivel láser Leica Rugby 840 y un receptor Rod Eye 180 RF como se observa en la Fig. 6 b).

Se identificó zonas críticas de la superestructura representativas del estado patológico y libres de obstáculos visuales. Las superficies fueron limpiadas de vegetación, eflorescencias y material suelto.

Previamente al ensayo se verificó la calibración y autonivelación del equipo láser rotativo. El instrumento se instaló sobre base estable en posición estratégica que cubriera toda el área de interés, proyectando un plano láser horizontal de referencia (Fig. 6 c)).

Con receptor digital y mira telescópica se registraron lecturas en puntos previamente marcados, empleando reglas graduadas como se aprecia en la Fig. 6 a) y nivel de mano auxiliar cuando fue necesario. Todas las mediciones se anotaron sistemáticamente con coordenadas exactas del punto (viga, posición longitudinal y transversal), permitiendo la reconstrucción precisa del perfil deformado de la superestructura.



Fig. 6. Nivelación láser: a) Medición de desnivel, b) Equipo de nivelación, c) Vista de la luz del láser sobre viga

Nota: Elaboración propia (2025)

2.3.4 Verificación y modelación estructural

2.3.4.1 Recalculo manual independiente

Se recalcularon manualmente todos los elementos estructurales (losetas, vigas AASHTO-PCI tipo III pretensadas, vigas cabezal, diafrag-

mas y pilas circulares) utilizando Mathcad Prime 9.0. Se adoptaron las resistencias especificadas en los planos de diseño:

- Vigas: $f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$
- Losa y diafragmas: $f_c = 280 \text{ kg/cm}^2$

Las pérdidas de pretensado se estimaron según AASHTO LRFD Art. 5.9.5 (pérdida total promedio del 22%). Este recálculo permitió confirmar el cumplimiento de los estados límite último y de servicio en condiciones teóricas de diseño.

2.3.4.2 Modelación numérica tridimensional

Se construyó un modelo completo en CSI Bridge v.24.0 (Fig. 7), empleando:

- **Elementos frame:** vigas principales, vigas cabezal y pilas.
- **Elementos shell de espesor variable:** losetas y diafragmas.

Las cargas consideradas incluyeron:

- **Cargas permanentes:** peso propio (DC) y peso muerto adicional (asfalto proyectado: $2,5 \text{ kN/m}^2$, DW).
- **Cargas vivas:** vehículo HL-93 (camión de diseño + carga de carril uniforme de $9,3 \text{ kN/m}$).
- **Factor de impacto dinámico:** $IM = 33\%$.
- **Combinaciones críticas:** Strength I ($1,25DC + 1,50DW + 1,75(LL+IM)$), Service I y Service III según AASHTO LRFD.

Condiciones reales incorporadas al modelo (obtenidas de los END):

- Asentamientos diferenciales medidos por nivelación láser (31 mm entre pilas).
- Rotación del cabezal izquierdo (18 mm hacia el eje longitudinal).
- Pérdida de rigidez torsional por daño en diafragmas (reducción del 40% del módulo de cortante efectivo, estimada a partir de las discrepancias geométricas y el patrón de fisuración).

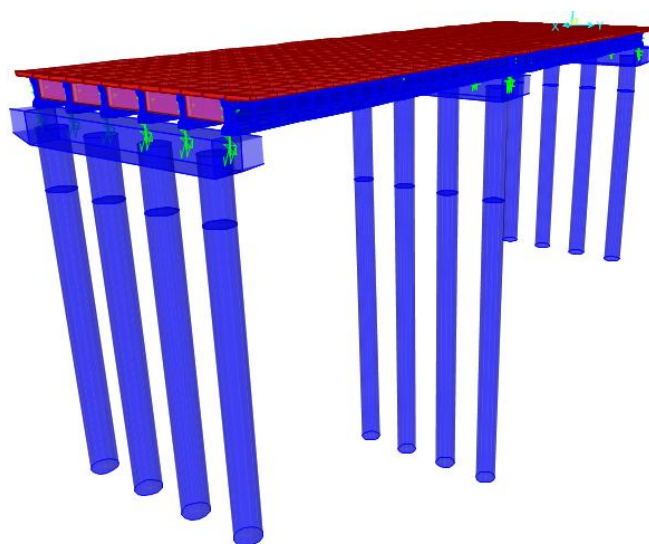


Fig. 7. Simulación estructural en CSI Bridge V.24.0

Nota: Elaboración propia en el CSI Bridge v.24.0 (2025)

2.3.5 Análisis comparativo diseño-ejecución

Con los datos obtenidos del relevamiento geométrico y los END, se realizó un análisis comparativo entre:

- El diseño estructural según planos del proyecto (SICOES).
- La verificación estructural mediante modelación en CSI Bridge.

- Los datos obtenidos in situ (geometría real, recubrimientos, disposición de armaduras).

Este análisis permitió cuantificar las discrepancias y estimar su impacto en la capacidad resistente y rigidez de la estructura.

2.3.6 Límites

No se realizaron ensayos destructivos (extracción de núcleos) para no comprometer la integridad estructural remanente. Además de que el proyecto a la fecha se encuentra en un proceso judicial, por lo que no puede realizarse ninguna intervención que altere las condiciones originales y reales del proyecto.

3. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada una de las etapas de la investigación, organizados de acuerdo con los ensayos y procedimientos descritos en la metodología. Para un mejor entendimiento la discusión se integra en cada subtítulo, contrastando los hallazgos con la literatura especializada.

3.1 Recopilación documental

Del análisis de la documentación obtenida del Sistema de Contrataciones del Estado (SICOES) [18], se logró recuperar la siguiente información técnica del proyecto:

- Documento Base de Contratación (DBC): Contenido de presentación de propuestas y adjudicación.
- Especificaciones técnicas: Listado de ítems constructivos, materiales, procedimientos constructivos, medición y forma de pago.
- Planos de diseño: Planos estructurales y detalles constructivos originales.
- Documentación complementaria: Modificaciones del proyecto en etapa de ejecución y resolución de contrato.

La disponibilidad de la documentación original resultó fundamental para la verificación geométrica y estructural posterior. Sin embargo, se evidenció que los planos de diseño no incluían especificaciones detalladas sobre los protocolos de protección superficial durante periodos de paralización, lo cual constituye una deficiencia común en proyectos de infraestructura en la región [6], [7].

3.2 Inspección visual y verificación geométrica

La verificación geométrica in situ confirmó que las dimensiones de los elementos estructurales (vigas, losetas, diafragmas y pilas) se ajustan a lo especificado en los planos de diseño, con desviaciones máximas de ± 3 mm, las cuales no resultan significativas para el cálculo estructural. Sin embargo, como se observa en la Tabla II, la inspección visual permitió identificar una sintomatología diversa de patologías en el hormigón armado, clasificables en:

TABLA II: PATOLOGÍAS IDENTIFICADAS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Tipo de patología	Elementos afectados	Descripción
Ataques químicos	Vigas, losetas, diafragmas	Carbonatación generalizada (confirmada con fenolftaleína)
Ataques físicos	Vigas cabezal, losetas	Eflorescencias, desprendimientos superficiales
Patologías exógenas	Armaduras expuestas	Corrosión avanzada en barras sin recubrimiento
Patologías endógenas	Vigas, diafragmas	Fisuración por retracción y por cargas

Los hallazgos coinciden con lo reportado por Porto [19] y Di Maio et al. [16], quienes señalan que la ausencia de mantenimiento en estructuras paralizadas acelera significativamente los procesos de degradación, especialmente en ambientes con humedad relativa variable como el valle de Cochabamba. La carbonatación generalizada observada (sin pigmentación tras aplicación de fenolftaleína al 1%) indica que el frente de carbonatación ha atravesado la totalidad del recubrimiento en múltiples zonas, condición que, según Traversa & Villagrán Zaccardi [15], reduce la protección pasiva de las armaduras frente a la corrosión.

3.3 Ensayos no destructivos

3.3.1 Esclerometría (ASTM C805-18)

La Tabla III presenta los valores promedio de dureza superficial obtenidos para cada tipo de elemento estructural.

TABLA III: RESUMEN DE VALORES PROMEDIO DE ESCLEROMETRÍA

Nota: Los valores corresponden al promedio de 482 impactos válidos. Se aplicó el criterio de descarte de valores fuera del rango promedio ± 6 unidades según ASTM C805-18.

Elemento estructural	Dureza superficial promedio (kg/cm ²)	Desviación estándar (kg/cm ²)
Viga tesada	538	28,5
Viga sin tesar	500	25,0
Diafragma	362	18,2
Loseta	328	15,6

Aunque los valores de dureza superficial parecen indicar un hormigón de alta resistencia, es fundamental considerar dos factores críticos:

1. **Carbonatación:** La prueba con fenolftaleína al 1% reveló carbonatación generalizada en todas las superficies ensayadas. Como señala Porto [19], la capa de carbonatación genera un aumento artificial de la dureza superficial medida por el esclerómetro, pudiendo sobreestimar la resistencia real a compresión. Mosqueira (2019) cuantifica esta sobreestimación hasta en un 13% según la profundidad de carbonatación y el tiempo de exposición.
2. **Correlación limitada:** La esclerometría mide exclusivamente la dureza superficial, no la resistencia interna del hormigón. Cortes (1987) advierte que esta limitación es particularmente relevante en estructuras con carbonatación avanzada o con deterioro interno, como es el caso del Puente Concordia.

Por lo tanto, aunque los valores registrados superan holgadamente los requerimientos de diseño, no pueden interpretarse como evidencia de integridad estructural. Por el contrario, la combinación de alta dureza superficial con carbonatación generalizada sugiere un fenómeno

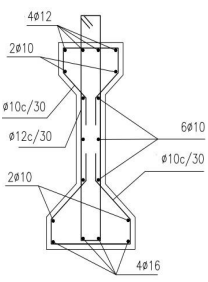
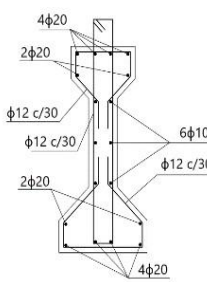
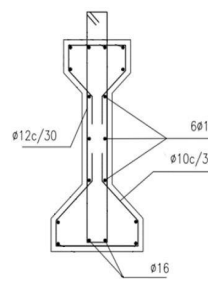
de “endurecimiento superficial engañoso”, donde la capa externa carbonatada oculta un posible deterioro interno.

3.3.2 Pachometría

La pachometría permitió: (1) localizar la posición real de las armaduras longitudinales y transversales, (2) determinar los diámetros nominales y (3) medir los recubrimientos de hormigón.

La Tabla IV (resumida a continuación) compara los datos de diseño, la verificación estructural y los relevamientos in situ para una viga tipo.

TABLA IV: COMPARACIÓN DISEÑO/VERIFICACIÓN ESTRUCTURAL/DATOS IN SITU (VIGA TIPO)

VIGA TIPO		
Diseño (SICOES)	Verificación Estructural (CSiBridge)	In Situ
		

Nota: La variación en recubrimientos alcanza hasta 10 mm por debajo del mínimo normativo en zonas localizadas.

Se observó una aproximación del 90% entre el diseño, la verificación estructural y el relevamiento in situ. Sin embargo, las discrepancias identificadas tienen implicaciones significativas:

1. **Recubrimientos insuficientes:** En algunos puntos, los recubrimientos se encontraron hasta 10 mm por debajo del mínimo especificado (40 mm). Esta condición aumenta sustancialmente la probabilidad de corrosión inducida por carbonatación, especialmente en ambientes con ciclos de humedad [17].
2. **Pérdida de rigidez estimada:** Las discrepancias geométricas y de disposición de armaduras se tradujeron en una pérdida de rigidez estimada entre el 20% y 30% en elementos tipo viga, valor que fue incorporado en el modelo de CSI Bridge para la verificación estructural.
3. **Corrosión evidenciada in situ:** Aunque no se realizaron ensayos destructivos para cuantificar la corrosión, la inspección visual de armaduras expuestas (por desprendimiento de recubrimiento) reveló corrosión avanzada con pérdida de sección significativa en múltiples puntos.

3.3.3 Fisurimetría (ACI 224R-01)

Se evaluaron 18 elementos estructurales, clasificando las aberturas según ACI 224R-01 en fisuras (< 1 mm) y grietas (≥ 1 mm). La Tabla V resume los anchos máximos registrados.

TABLA V: RESUMEN DE ANCHOS DE FISURAS EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO

Elemento	Ancho de fisura (mm)	Clasificación
Vigas 1-6	0,05 - 0,50	Fisuras
Diafragmas 1-5	0,05 - 0,60	Fisuras
Loseta 1	1,20	Grieta
Losetas 2-5, 8	0,05 - 0,40	Fisuras
Viga cabezal central	0,05 - 0,20 (fisuras) / 2,0 - 3,0 (grieta principal)	Fisuras / Grieta severa

Se observó predominio de fisuras por contracción térmica y por cargas muertas, con longitudes de hasta 1 m en diafragmas.

Según Sotomayor (2020), las fisuras con ancho inferior a 0,3 mm no comprometen la durabilidad a corto plazo. Sin embargo, en el Puente Concordia se identificaron dos situaciones críticas:

1. **Grieta de 2,0-3,0 mm en viga cabezal central:** Este nivel de abertura supera ampliamente los límites admisibles para estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes no agresivos (ACI 224R-01 establece 0,41 mm como máximo para condiciones de exposición moderada). La magnitud y ubicación de esta grieta sugiere la existencia de tensiones por torsión acumuladas, probablemente inducidas por asentamientos diferenciales.
2. **Fisuras generalizadas en diafragmas:** El patrón de fisuración en diafragmas (0,50-0,60 mm en Diafragma 3) indica una pérdida de rigidez torsional que compromete la redistribución de cargas entre vigas. Este hallazgo es consistente con la reducción del 40% en el módulo de cortante efectiva incorporada al modelo numérico.

La correlación entre el patrón de fisuración y los asentamientos diferenciales (31 mm) detectados por nivelación láser refuerza la hipótesis de que la estructura ha experimentado deformaciones diferenciales durante el periodo de paralización, posiblemente asociadas a la consolidación diferencial de las fundaciones o a cambios en las condiciones de apoyo.

3.3.4 Nivelación láser

La nivelación láser permitió reconstruir el perfil deformado de la superestructura, detectando:

- **Asentamiento diferencial entre pilas:** 31 mm.
- **Rotación del cabezal izquierdo:** 18 mm hacia el eje longitudinal.
- **Desnivel local en viga cabezal extremo:** 3 cm en una longitud de 1,20 m (viga BPR).

La Fig. 8 presenta el diagrama de tensiones en las losas del puente modelado en CSI Bridge v.24.0, evidenciando la concentración de tensiones inducidas por los asentamientos diferenciales.

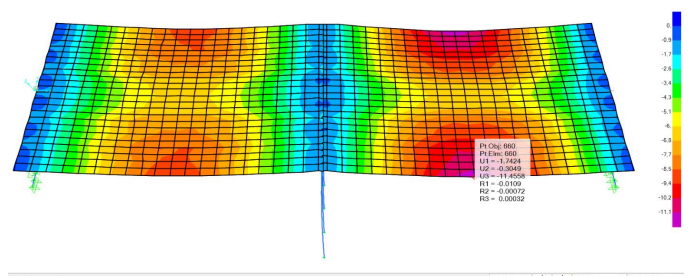


Fig. 8. Diagrama de tensiones en las losas del puente mediante CSI Bridge v.24.0

Nota: Elaboración propia en el CSI Bridge v.24.0 (2025)

Los asentamientos diferenciales de 31 mm entre pilas son significativamente superiores a los valores admisibles para estructuras isostáticas o hiperestáticas de hormigón pretensado. La normativa AASHTO LRFD (2020) no establece un límite explícito para asentamientos diferenciales en estructuras existentes, pero valores superiores a 15-20 mm en puentes de luz media (≈ 22 m) suelen considerarse indicadores de riesgo, especialmente cuando se acompañan de rotaciones en los apoyos.

La rotación de 18 mm en el cabezal izquierdo es particularmente preocupante, ya que indica una posible pérdida de capacidad de soporte o una deformación diferencial de la subestructura. Este fenómeno, combinado con la grieta de 3 mm en el cabezal central, sugiere que la estructura ha superado el rango de comportamiento elástico y presenta daños permanentes.

El desnivel local de 3 cm en una longitud de 1,20 m (pendiente $\approx 2,5\%$) no solo afecta la funcionalidad (superficie de rodadura), sino que genera concentraciones de tensiones adicionales que aceleran el deterioro de la losa y las vigas.

3.4 Verificación y modelación estructural

3.4.1 Análisis comparativo diseño-ejecución

El análisis comparativo de la Tabla VI entre el diseño original, la verificación estructural y los datos in situ arrojó los siguientes resultados:

TABLA VI: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO FRENTE A LO EJECUTADO

Elemento	Estado según diseño	Estado según verificación in situ	Conclusión
Losa y losa en voladizo	Ajustado a AASHTO LRFD	Dimensiones y refuerzos adecuados	Conforme
Diafragmas	Ajustado a AASHTO LRFD	Cumple requisitos normativos	Conforme (con daño)
Barreras	Ajustado a AASHTO LRFD	Cumple requisitos de seguridad	Conforme
Pilas	Ajustado a AASHTO LRFD	Dimensiones, refuerzo y capacidad adecuados	Conforme
Vigas AASHTO-PCI III	Ajustado a AASHTO LRFD	Discrepancia menor identificada	Aceptable (con observación)

La ligera discrepancia identificada en el diseño de las vigas (aproximación del 90% entre diseño y ejecución) no compromete funcional ni estructuralmente la capacidad portante en condiciones teóricas. Sin embargo, cuando se incorporan las condiciones reales de deterioro (carbonatación, fisuración, asentamientos, pérdida de rigidez), el margen de seguridad se reduce considerablemente.

3.4.2 Modelación con condiciones reales

El modelo numérico en CSI Bridge v.24.0, alimentado con los datos ob-

tenidos de los END (asentamientos de 31 mm, rotación de 18 mm, pérdida de rigidez del 20-30% en vigas y 40% en diafragmas), evidenció:

- 1. Incremento de tensiones principales:** Las tensiones de tracción en las vigas superan en un 35-40% los valores previstos en condiciones de diseño, principalmente por el efecto hiperestático de los asentamientos diferenciales.
- 2. Pérdida de capacidad portante:** La capacidad remanente de la superestructura frente a la carga viva HL-93 se estimó entre un 40% y 55% de la capacidad de diseño original, insuficiente para garantizar la seguridad ante solicitaciones de servicio.
- 3. Riesgo de colapso progresivo:** La combinación de pérdida de rigidez en diafragmas (40%) y fisuración generalizada genera una redistribución no controlada de cargas, aumentando la probabilidad de fallo por cortante en vigas extremas.

3.5 Síntesis integrada de resultados

La Tabla VII resume la condición final de la superestructura del Puente Concordia, integrando los hallazgos de todos los ensayos y análisis.

TABLA VII: SÍNTESIS INTEGRADA DE LA CONDICIÓN ESTRUCTURAL

Parámetro evaluado	Condición encontrada	Impacto estructural
Carbonatación	Generalizada (profundidad > recubrimiento)	Alto (pérdida de protección de armaduras)
Recubrimiento de armaduras	Insuficiente (hasta -10 mm bajo mínimo)	Alto (corrosión acelerada)
Fisuración	Fisuras generalizadas + grietas hasta 3 mm	Alto (pérdida de rigidez y durabilidad)
Asentamientos diferenciales	31 mm entre pilas + rotación 18 mm	Muy alto (tensiones hiperestáticas)
Resistencia superficial	Alta (328-570 kg/cm ²)	Bajo (no representativa por carbonatación)
Pérdida de rigidez	20-30% vigas, 40% diafragmas	Muy alto (incumplimiento de estados límite)
Capacidad portante remanente	40-55% de la capacidad de diseño	Muy alto (inviabile para cargas de servicio)

3.6 Limitaciones del estudio

3.6.1 Limitaciones de los ensayos no destructivos

No se realizaron ensayos destructivos (extracción de testigos de hormigón ni extracción de armaduras) debido a dos razones: (a) no comprometer la integridad estructural remanente de un elemento que ya presenta daños significativos, y (b) el proyecto se encuentra en proceso judicial, por lo que no puede realizarse ninguna intervención que altere las condiciones originales de la estructura. Como consecuencia de esta decisión:

- Los valores de resistencia a compresión obtenidos mediante esclerometría (ASTM C805-18) no fueron calibrados con ensayos destructivos. La carbonatación generalizada puede haber sobreestimado los valores reales de resistencia superficial, aunque la literatura reporta sobreestimaciones típicas entre el 10% y 20% para profundidades de carbonatación superiores al recubrimiento (referencia)
- No se pudo cuantificar directamente la pérdida de sección por corrosión en las armaduras. La inspección visual de armaduras

expuestas (por desprendimiento de recubrimiento) reveló corrosión avanzada, pero no se midió la reducción efectiva de diámetro.

3.6.2 Limitaciones del modelo numérico

El modelo en CSI Bridge v.24.0 incorporó las condiciones reales medidas in situ (asentamientos diferenciales, rotaciones, pérdidas de rigidez estimadas). Sin embargo, presenta las siguientes simplificaciones:

- **Interacción suelo-estructura no modelada**

La rotación de 18 mm en el cabezal izquierdo y los asentamientos diferenciales de 31 mm entre pilas fueron introducidos como desplazamientos impuestos en el modelo, pero no se modeló la interacción entre las pilas y el terreno. No se realizaron ensayos de penetración estándar (SPT), ensayos de placa de carga ni estudios geotécnicos complementarios que permitieran determinar si los asentamientos se deben a consolidación diferencial del suelo, a una capacidad portante deficiente de las fundaciones, o a una combinación de ambos. Por lo tanto, el modelo no puede distinguir entre daños originados en la superestructura versus daños originados en la subestructura o el terreno de fundación.

- **Pérdida de rigidez estimada, no medida directamente**

La reducción del módulo de cortante efectivo en diafragmas (40%) y la pérdida de rigidez en vigas (20-30%) fueron estimadas a partir del patrón de fisuración y de las discrepancias geométricas entre diseño y ejecución, no mediante ensayos específicos como ultrasonidos (ASTM C597) o medición de frecuencias modales in situ. Un análisis modal operacional (output-only modal analysis) o ensayos de vibración ambiental habrían permitido cuantificar con mayor precisión la pérdida de rigidez real de la estructura.

- **Comportamiento no lineal del hormigón fisurado**

El modelo asumió un comportamiento lineal elástico para los materiales, con las rigideces reducidas como se indicó. No se modeló explícitamente la fisuración del hormigón ni el comportamiento no lineal del acero de refuerzo. Las tensiones calculadas en zonas fisuradas (especialmente en la viga cabezal con grieta de 3 mm) pueden estar subestimadas, ya que el modelo lineal no captura la concentración de tensiones en el frente de fisura.

3.6.3 Limitaciones en la evaluación de alternativas de rehabilitación

El análisis de inviabilidad técnica de la rehabilitación se basa en criterios estructurales y económico-conceptuales, pero no incluye un diseño detallado de alternativas de reforzamiento (ej. encamisado con hormigón proyectado, refuerzo con FRP, postensado externo) ni una evaluación de costos con presupuesto detallado. Una empresa consultora especializada podría desarrollar diseños específicos y obtener licitaciones de precios, lo que podría matizar la estimación del 70-80% del costo de reconstrucción aquí presentada. Por lo tanto, la conclusión de inviabilidad debe entenderse como una recomendación técnica preliminar basada en la magnitud del daño observado, no como un estudio de factibilidad económico detallado.

3.6.4 Generalización de los resultados

El presente estudio es un estudio de caso único (n=1) sobre un puente específico con condiciones climáticas, geotécnicas y constructivas particulares del valle de Cochabamba. Las conclusiones sobre la inviabilidad técnica no son directamente extrapolables a otros puentes paralizados sin evaluaciones específicas. Sin embargo, la metodología aplicada (END + verificación geométrica + modelación con condiciones reales) y las lecciones aprendidas (carbonatación acelerada, pérdida de rigidez, asentamientos diferenciales) sí pueden ser transferibles a contextos análogos en Latinoamérica.

4. CONCLUSIONES

A partir de la evaluación patológica del Puente Concordia mediante ensayos no destructivos y modelación estructural, se establecen las siguientes conclusiones:

1. **Deterioro avanzado e irreversible:** La superestructura del Puente Concordia presenta carbonatación generalizada, recubrimientos de armaduras insuficientes (hasta 10 mm por debajo del mínimo), fisuras generalizadas (0,05-0,60 mm), grietas de hasta 3 mm en cabezales, asentamientos diferenciales de 31 mm entre pilas y rotación de 18 mm en el cabezal izquierdo. Estas patologías, combinadas con pérdidas de rigidez del 20-30% en vigas y 40% en diafragmas, configuran un escenario de deterioro irreversible.
 2. **Viabilidad técnica de rehabilitación:** La capacidad portante remanente de la superestructura se estima entre el 40% y 55% de la capacidad de diseño original para la carga viva HL-93, insuficiente para garantizar la seguridad según AASHTO LRFD 2020. Si bien existen técnicas de reforzamiento estructural aplicables a puentes de hormigón pretensado (encamisado de vigas, refuerzo con FRP, inyección de fisuras y reparación de recubrimientos), su aplicación en el Puente Concordia enfrentaría tres limitaciones insalvables:
 - **Condición de carbono:** La carbonatación generalizada (profundidad > recubrimiento) ha eliminado la pasivación de las armaduras, requiriendo la remoción completa del recubrimiento existente y su reposición con morfología anticarbonatación, lo que representa una intervención prácticamente total de la superestructura.
 - **Daño estructural acumulado:** Las grietas de hasta 3 mm en vigas cabezal, la pérdida de rigidez del 40% en diafragmas y los asentamientos diferenciales de 31 mm indican que la estructura ha superado el rango elástico, con daños permanentes que no son reversibles mediante técnicas convencionales.
- Por lo tanto, si bien no se puede afirmar que “no exista” ninguna intervención posible, se concluye que no existe una intervención técnicamente recomendable ni económicamente competitiva frente a la demolición y reconstrucción. En el contexto de la gestión pública de infraestructura, donde los recursos son limitados y se prioriza la relación costo-beneficio a largo plazo, la rehabilitación del Puente Concordia se califica como inviable.
3. **Recomendación de demolición total:** Se recomienda la demolición total de la superestructura del Puente Concordia (vigas, losetas, diafragmas y vigas cabezal) y su posterior reconstrucción

3.con nuevos diseños y materiales. La subestructura (pilas y estribos) podría ser reutilizable previa evaluación complementaria, aunque esta determinación excede el alcance del presente estudio.

4. Limitación de los END sin calibración destructiva: Los ensayos no destructivos, si bien son herramientas valiosas, presentan limitaciones cuando no se complementan con calibración destructiva (extracción de testigos). En este caso, la esclerometría sobreestimó la resistencia real del hormigón debido a la carbonatación, evidenciando la necesidad de enfoques multimodales en estructuras deterioradas.
5. Aportes para la gestión de infraestructura en Latinoamérica: El caso del Puente Concordia demuestra la urgencia de implementar protocolos obligatorios de inspección periódica para obras paralizadas en contextos latinoamericanos. Se recomienda a las entidades contratantes y fiscalizadoras incluir cláusulas específicas de mantenimiento durante periodos de suspensión de obra, así como la realización de evaluaciones patológicas previas a cualquier decisión de reactivación.
6. Líneas de investigación futura: Se sugiere profundizar en: (a) el desarrollo de correlaciones regionales para esclerometría en hormigones carbonatados del valle de Cochabamba, (b) metodologías no destructivas para cuantificación precisa de corrosión en armaduras sin extracción, y (c) protocolos de inspección estandarizados para obras paralizadas adaptados a normativa boliviana.

Referencias

- [1] Oliveras, "Evaluación, diagnóstico patológico y propuesta de intervención del puente de Heredia," Tesis doctoral, Univ. de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.57799/11227/7943>
- [2] C. A. Bustamante y D. A. González, "Evaluación, diagnóstico y propuesta de intervención para la patología del puente Román ubicado en el barrio Manga*, Cartagena de Indias, Colombia: Univ. de Cartagena, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.57799/11227/7490>
- [3] CADECOCRUZ, "Puente colapsa en la ciudad de Cochabamba," 2015. [En línea]. Disponible en: <https://cadecocruz.org.bo/index.php?op=200&gr=1&nw=308>. [Accedido: 24-nov-2025].
- [4] *Los Tiempos*, "El viaducto estará listo en 8 meses," 17-feb-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.lostiempos.com/actualidad/local/20170217/viaducto-estara-listo-8-meses>
- [5] *Opinión*, "Inspeccionan obra abandonada en 2018 en Quillacollo y se prevé auditoría," 17-feb-2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.opinion.com.bo/articulo/cochabamba/inspeccionan-obra-abandonada-2018-quillacollo-preve-auditoria/20220217164602855691.html>
- [6] J. C. Tarifeño Vásquez y G. D. Odicio Manrique, "Evaluación de patologías y su influencia en una propuesta de mantenimiento del puente Bellavista, provincia de Bellavista y departamento de San Martín," 2021. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.14503/1644>
- [7] V. K. Grandes López y P. Martínez Chávez, "Determinación de patologías para una propuesta de mantenimiento del puente Colombia, distrito de Juan Guerra, provincia y departamento de San Martín," 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.14503/3099>
- [8] C. A. López Piñeres, "Análisis de las patologías que se presentan en los puentes a causa de los fenómenos sísmicos y climatológicos en Colombia para generar una propuesta de un plan de mantenimiento a elementos estructurales y no estructurales." [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12494/54220>
- [9] M. G. Chulde Recto, "Diagnóstico de las patologías estructurales del puente Divino Niño ubicado en la calle 10 de agosto y Febres Cordero-Jipijapa," Tesis de licenciatura, Univ. Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador, 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/7792>
- [10] F. M. Mato, M. O. Cornejo, I. P. Sánchez, S. S. Fernández-Polanco y E. B. Bujalance, "Aplicación de los sistemas mixtos para el refuerzo de patologías en puentes de hormigón," *Hormigón y Acero*, vol. 72, n.ºs 294-295, pp. 249-263, 2021. <https://doi.org/10.33586/hya.2021.3058>
- [11] W. Y. Cáceres Parada y Z. Pradilla Atuesta, "Elaboración de una guía metodológica para la evaluación de vulnerabilidad estructural en puentes colgantes de uso peatonal," 2023.
- [12] E. H. V. González, "Determinación y evaluación del nivel de incidencia de las patologías del concreto en edificaciones de los municipios de Barbosa y Puente Nacional del departamento de Santander," Univ. Militar Nueva Granada, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/b184eea0-7a3f-48a0-b116-faa340dfa206/content>
- [13] T. Corral, "Patología de la construcción: grietas y fisuras en obras de hormigón; origen y prevención," *Ciencia y Sociedad*, vol. 29, n.º 1, pp. 72-114, 2004. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87029104>
- [14] A. D. Río Bueno, "Patología, reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado de edificación," 2008. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/1159/>
- [15] L. P. Traversa y Y. A. Villagrán Zaccardi, "Introducción a la durabilidad y patología de las estructuras de hormigón armado," en *IX Jornada Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio*, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://digital.cic.gba.gob.ar/server/api/core/bitstreams/1d2f78f7-6c77-4ac2-9588-7f7087cd0300/content>
- [16] A. A. Di Maio, L. P. Traversa y J. D. Sota, "Metodología de evaluación de patologías para la reparación de estructuras de hormigón armado," 2011. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11336/102196>

- [17] N. T. Mascia y A. L. Sartorti, "Identificación y análisis de patologías en puentes de carreteras urbanas y rurales," **Rev. Ing. Construcción**, vol. 26, n° 1, pp. 5–24, 2011. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732011000100001>
- [18] Estado Plurinacional de Bolivia, "Sistema de Contrataciones Estatales (SICOES)," [En línea]. Disponible en: <https://www.sicoes.gob.bo/portal/index.php> [Accedido 10-ene-2026]
- [19] J. M. Porto, "Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado", 2005. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2183/13853>
- [20] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9th ed. Washington, DC: AASHTO, 2020
- [21] M. Carsana, F. Biondini, and E. Redaelli, "Diagnostic procedure for corrosion assessment of existing concrete bridges: Experimental case study," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 21, 2025. <https://doi.org/10.1080/15732479.2025.2504534>
- [22] C. Andrade, F. Ballio y M. Bartolac, "Gestión de la vida útil, ensayos y monitorización de la salud estructural de estructuras de hormigón existentes: informe sobre el estado del arte." *fib Bulletin* 109 (2023). <http://hdl.handle.net/20.500.11850/718756>
- [23] F. Binder and S. L. Burtscher, "Advanced monitoring and analysis of durability challenges in highway infrastructure," *ce/papers*, vol. 8, no. 5, pp. 250-257, 2025. <https://doi.org/10.1002/cepa.70013>
- [24] N. Bertola and E. Brühwiler, "Transforming the static system of prestressed concrete bridges using UHPFRC," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 30, no. 7, 2025. <https://doi.org/10.1061/JBENF2.BEENG-7234>



REVISTA INGENIO

Análisis de la Madurez y Falencias de Ciberseguridad en el Sector Inmobiliario y de la Construcción ante la Transformación Digital

Analysis of Cybersecurity Maturity and Deficiencies in the Real Estate and Construction Sector Facing Digital Transformation

Martin Sebastián Jacome Zabala | Universidad Tecnológica Israel

Tannia Cecilia Mayorga Jácome | Universidad Tecnológica Israel

Recibido: 29/11/2025

Recibido tras revisión: 29/04/2026

Aceptado: 15/07/2026

Publicado: 31/07/2026

Palabras clave (UNESCO)

Ciberseguridad, Industria de la construcción, Transformación digital, Gestión de riesgos, Protección de datos.

KEY WORDS

Cybersecurity, Construction industry, Digital transformation, Risk management, Data protection.

RESUMEN

Los sectores de la construcción y bienes raíces han estado en una fase importante de transformación tecnológica, donde han adoptado una variedad de herramientas modernas como el Modelado de Información de Construcción (BIM), Gemelos Digitales, Inteligencia Artificial, etc. Pero esta digitalización ha superado la capacidad del segmento para defender sus activos digitales. A diferencia de la manufactura o la banca, la construcción carece de marcos de ciberseguridad establecidos, dejando la información financiera, técnica y personal vulnerable a riesgos sistémicos de espionaje y sabotaje. 2) Objetivo: La intención de este estudio es diagnosticar esta brecha en ciberseguridad de la industria y descubrir algunas debilidades estructurales y culturales para prevenir una defensa efectiva. El programa busca comparar la madurez digital con diferentes industrias y proponer tecnologías de gestión de riesgos adaptadas al paisaje siempre cambiante de los proyectos de construcción. 3) Metodología: La recolección de datos fue cualitativa basada en una Revisión Sistemática de Literatura (SLR). De bases de datos clasificadas, se eligieron y revisaron en profundidad 20 artículos de impacto científico (2021-2025), revisando estudios de caso de diferentes países, incluidos, pero no limitados a, Australia, el Reino Unido, Asia y el mundo árabe. 4) Los principales hallazgos: Se encontró que la “seguridad de la información” tiene un papel en la configuración de los aspectos psicológicos y técnicos de la adopción de BIM y Contratos Inteligentes. Se observó que los riesgos eran tanto tecnológicos como humanos, debido a la baja percepción del riesgo y la baja disciplina organizacional. Además, el uso de IA generativa (ChatGPT) sin protocolos, abre nuevas amenazas a la privacidad. 5) Conclusiones clave: Se concluye que en lugar de adoptar herramientas genéricas de TI, se deben construir modelos específicos de construcción (por ejemplo, CISS para informes) y habilitar foros de intercambio de información para la defensa colectiva. La ciberseguridad es una disciplina de protección de activos estratégicos, no un costo operativo.

ABSTRACT

The construction and real estate industries are in a critical phase of technological transformation, adopting advanced tools such as Building Information Modeling (BIM), Digital Twins, and Artificial Intelligence. However, this digitalization has outpaced the sector's capacity to protect its digital assets. Unlike manufacturing or banking, construction lacks consolidated cybersecurity frameworks, exposing financial, technical, and personal information to systemic risks of espionage and sabotage. 2) Objectives: The main purpose of this research is to diagnose the current state of cybersecurity in the sector; identifying the structural and cultural gaps that hinder effective defense. It seeks to comparatively analyze digital maturity against other industries and propose risk management frameworks adapted to the dynamic nature of construction projects. 3) Methodology: A qualitative methodology based on a Systematic Literature Review (SLR) was employed. Twenty high-impact scientific articles (2021-2025) from indexed databases were selected and critically analyzed, evaluating case studies in diverse contexts such as Australia, the United Kingdom, Asia, and the Arab world. 4) Main results: The findings reveal that “information security” is a key psychological and technical barrier to the adoption of BIM and Smart Contracts. It was identified that the risks are not only technological but also human, stemming from a low perception of risk and a lack of organizational discipline. Furthermore, it is evident that the use of generative AI (ChatGPT) without protocols introduces unprecedented privacy vulnerabilities. 5) Main conclusions: It is concluded that the solution lies not in adopting generic IT tools, but in implementing specific models for construction (such as CISS for reporting) and fostering collective defense through information-sharing forums. Cybersecurity must be redefined as a strategic discipline for asset protection and not as an operational cost.

1. Introducción

La economía global experimenta una transición acelerada hacia la Cuarta Revolución Industrial, caracterizada por la fusión de sistemas físicos y digitales. En este contexto, el sector de la construcción y el ámbito inmobiliario han iniciado una migración agresiva hacia la digitalización para mantener su competitividad. Este es un fenómeno mundial y medible; por ejemplo, la implementación de la estrategia nacional de transformación digital (2023-2029) en economías emergentes como Kazajistán ha posicionado exitosamente al país en el puesto 36 a nivel mundial en competitividad digital. Pero el progreso ha descubierto una fragilidad crítica: la infraestructura de seguridad de datos no se mantuvo al ritmo de la implementación tecnológica, estableciendo un contexto en el que la innovación superó a la protección. [1].

1.1 Contexto de la Problemática: La Asimetría Industrial

El problema no es tanto la digitalización en sí, sino la asimetría en su madurez de seguridad. La literatura científica destaca una brecha alarmante entre la construcción y otros sectores industriales, específicamente la manufactura. Un estudio comparativo exhaustivo demuestra que, aunque el sector manufacturero ha implementado normas de protección consistentes con los estándares de seguridad dentro de entornos controlados, la construcción se está quedando atrás.[2].

Este estudio sugiere que, aunque el “Gemelo Digital” parece ser uno de los instrumentos habilitadores más significativos para la transformación económica —particularmente a raíz de la pandemia de COVID-19—, su implementación en la construcción enfrenta más desafíos que en la manufactura. Esta ausencia de unificación de estándares y serias deficiencias en la protección de datos a lo largo del ciclo de vida del proyecto llevan al sector a no alcanzar su máximo potencial, exponiéndolo a riesgos que ya han sido mitigados en otros sectores industriales[2].

Esta vulnerabilidad se agudiza debido a la naturaleza sistémica de las obras. A diferencia de una fábrica cerrada, un proyecto de construcción es un ecosistema de “límites superpuestos” (overlapping boundaries). Turk et al. (2022) argumentan que la industria es específica y no puede depender de soluciones genéricas prestadas de otros sectores. En una obra, la información fluye entre arquitectos, ingenieros y contratistas temporales a través de fronteras organizacionales difusas, lo que hace ineficaces los métodos tradicionales de defensa perimetral. Se ha propuesto un marco que identifica tres tipos de actividades ilícitas fundamentales a prevenir: robar, mentir y dañar; aplicables a cuatro elementos: activos de información, materiales, personas y sistemas[3].

1.2 El Activo de la Información y el Factor Humano

En la economía moderna, la información —secretos comerciales, bases de datos de clientes, planos de infraestructura crítica— se ha convertido en el activo intelectual más valioso de las empresas constructoras. Se advierte que este capital es codiciado por competidores,

estados rivales y grupos criminales, convirtiendo al espionaje industrial en una amenaza tangible. El estudio enfatiza que la seguridad no es solo tecnología, sino un enfoque basado en la “disciplina”: reglas escritas y claras para superar la informalidad operativa del sector[4].

Sin embargo, la gestión de este activo enfrenta obstáculos internos. Al analizar la eficacia de la ciberseguridad en firmas del Reino Unido utilizando el modelo McKinsey 7S extendido, se descubrió estadísticamente que los elementos más críticos no son tecnológicos. Los hallazgos subrayan que las “relaciones con terceros” y el “cumplimiento normativo” son factores determinantes de la efectividad de la seguridad, superando a la infraestructura técnica. Esto confirma que la cadena de suministro fragmentada es el eslabón más débil del ecosistema[5].

1.3 Nuevas Tecnologías, Nuevos Vectores de Ataque

La incorporación de tecnologías disruptivas ha ampliado la superficie de ataque. La Inteligencia Artificial Generativa (como ChatGPT) se utiliza cada vez más para tareas administrativas, pero su adopción carece de controles de privacidad adecuados. Un análisis bibliométrico reciente identificó tres clústeres principales de riesgos asociados a estas herramientas: preocupaciones de privacidad y ética (Clúster Rojo), vulnerabilidades ante ciberataques y generación de malware (Clúster Verde), y problemas de sesgo y precisión (Clúster Azul)[6].

De manera similar, la adopción de Contratos Inteligentes (Smart Contracts) enfrenta barreras significativas. Un estudio cuantitativo en el mercado de Arabia Saudita reveló que, aunque el 85.2% de los encuestados reconoce que el Internet de las Cosas (IoT) facilita estos contratos, existen 19 barreras críticas para su implementación. Entre ellas destacan las “preocupaciones por la ciberseguridad” y la falta de expertos capaces de auditar la seguridad de los códigos en Blockchain[7].

1.4 Justificación y Necesidad de Estandarización

Pese al incremento de riesgos, el sector adolece de una opacidad crónica. Se señala que la ausencia de un marco estandarizado para la notificación de incidentes impide la creación de una base de datos centralizada, lo que bloquea el aprendizaje colectivo. La implementación de modelos cuantitativos como la Escala de Gravedad de Incidentes de Ciberseguridad (CISS) es imperativa para transformar incidentes cualitativos en métricas comparables que permitan priorizar recursos y evaluar dimensiones como la seguridad física y el impacto financiero [8].

1.5 Propósito del Estudio

El propósito de este trabajo es realizar un análisis exhaustivo y “humanizado” de las falencias de ciberseguridad en el sector, contrastando la realidad operativa con las exigencias digitales. Los objetivos específicos son:

1. Evaluar la brecha de madurez tecnológica entre la construcción y la manufactura.

2. Identificar los factores humanos y organizacionales que actúan como barreras de defensa.
3. Analizar las vulnerabilidades específicas de tecnologías emergentes (IA, BIM, Smart Contracts).
4. Sistematizar marcos de solución validados (CISS, Machine Learning) para ofrecer una guía práctica a los actores del sector.

2. Método

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de carácter descriptivo y analítico. Dado que la ciberseguridad en el sector de la construcción es un campo de estudio emergente y fragmentado, se determinó que el diseño metodológico más adecuado para abordar los objetivos planteados era la **Revisión Sistemática de Literatura (SLR)**. Este método permite sintetizar la evidencia científica existente, identificar patrones comunes en diferentes contextos geográficos y evaluar la efectividad de los marcos teóricos propuestos por la academia en los últimos años[2].

El diseño de la investigación se alineó con enfoques metodológicos validados en estudios sectoriales previos. Por ejemplo, se tomó como referencia el rigor analítico empleado por Sonkor y García de Soto, quienes utilizaron un flujo de cinco pasos (definición del alcance, búsqueda, selección, análisis bibliométrico y discusión) para mapear los riesgos de la IA en la construcción[6]. De manera similar, se consideró el enfoque de triangulación metodológica propuesto por Siriwardhana et al., quienes validaron la importancia de recopilar perspectivas de expertos y utilizar la herramienta analítica SWOT (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) para examinar sistemáticamente los determinantes de la implementación tecnológica en la industria[9].

2.1 Material y Unidad de Análisis

Para la constitución del cuerpo teórico del estudio, se llevó a cabo una rigurosa selección de fuentes primarias. La unidad de análisis final consiste en 20 documentos científicos de alto impacto, incluyendo artículos de revistas, ponencias de conferencias internacionales y capítulos de libros especializados.

La base de datos bibliográfica se construyó priorizando la calidad y actualidad, asegurando que la información refleje el estado del arte post-pandemia y la reciente aparición de la Inteligencia Artificial. Los materiales provienen principalmente de editoriales prestigiosas como Elsevier, Springer e IEEE.

2.1.1 Criterios de Inclusión y Exclusión

Para garantizar la pertinencia de la muestra, se aplicaron los siguientes filtros:

- **Temporalidad (2021-2025):** Se seleccionaron exclusivamente investigaciones publicadas en los últimos cinco años. Este criterio fue fundamental para incluir estudios que abordaran tecnologías recientes como los Gemelos Digitales post-COVID y la IA generativa. Se excluyeron estudios anteriores que no contemplaran

el panorama actual de amenazas cibernéticas (ej. ransomware moderno).

- **Temática Específica (Intersección Sectorial):** Se incluyeron únicamente aquellos estudios que abordaran la convergencia entre “Ciberseguridad/TI” y “Sector Construcción/Inmobiliario”. Se descartaron artículos puramente técnicos de informática que carecieran de aplicación práctica en el entorno construido.
- **Diversidad Geográfica:** La muestra abarca estudios empíricos y teóricos de diversas regiones (Reino Unido, Australia, Noruega, Kazajistán, Malasia, Vietnam y Medio Oriente). Esto permite contrastar la madurez digital entre economías desarrolladas y emergentes.

2.2 Procedimiento de Análisis de Datos

El análisis de la información se estructuró siguiendo protocolos de categorización temática. Se extrajeron datos cuantitativos de los estudios empíricos (porcentajes de adopción, puntuaciones de riesgo) y se sintetizaron los marcos conceptuales cualitativos. Este proceso de síntesis se apoya en metodologías previas que han integrado revisiones literarias múltiples para construir marcos de evaluación de riesgos, como lo proponen Yao y García de Soto en el desarrollo de sus módulos de Machine Learning [10].

3. Resultados y Discusión

A partir de la revisión sistemática, se han identificado patrones críticos que explican el estado actual de vulnerabilidad en el sector. Los hallazgos se presentan categorizados por dimensiones estructurales, humanas y tecnológicas, contrastando la teoría académica con la evidencia empírica recolectada.

3.1 La Brecha de Madurez Digital: Comparativa Intersectorial

La literatura analizada coincide en un hallazgo estructural: la industria de la construcción sufre de un rezago tecnológico y de seguridad significativo en comparación con la industria manufacturera.

3.1.1 Lecciones del “Gemelo Digital” (Manufactura vs. Construcción)

El concepto de “Gemelo Digital” (Digital Twin) se ha convertido en el estándar para la Industria 4.0. Sin embargo, su implementación en la construcción enfrenta obstáculos que la manufactura ya ha superado. Según el estudio comparativo realizado por Abanda et al. (2025), mientras que la industria manufacturera aplica el gemelo digital a lo largo de **siete fases** del ciclo de vida del producto (desde la generación del concepto hasta el reciclaje), la construcción tiende a limitar su uso a fases aisladas, principalmente operación y mantenimiento [2].

El análisis revela que la construcción enfrenta “desafíos aún mayores” debido a la falta de unificación de estándares y, críticamente, a la debilidad en la protección de datos. A diferencia de las fábricas que operan en redes cerradas, los proyectos de construcción requieren compartir datos sensibles en entornos abiertos. Abanda et al. concluyen con cinco lecciones clave que la construcción debe adoptar de la manufactura: (1) acelerar el despliegue de hardware (sensores),

(2) unificar estándares de definición, (3) aplicar la tecnología al ciclo de vida completo, (4) mejorar la protección de datos y propiedad intelectual, y (5) aumentar la apertura al cambio cultural [2]

3.1.2 La Inercia Estructural (Caso Kazajistán)

La vulnerabilidad no es solo técnica, sino sistémica. En el contexto de economías en desarrollo, Salykov et al. (2025) analizaron la transformación digital en Kazajistán. Aunque el país ha alcanzado el puesto **36 en el ranking mundial de competitividad digital** gracias a estrategias gubernamentales (2023-2029), el estudio encontró que la seguridad de los datos sigue siendo un “desafío persistente”. La investigación concluye que la integración de tecnologías como IoT y BIM es crucial para el crecimiento, pero sin inversiones paralelas en ciberseguridad y adaptación regulatoria, la digitalización expone al sector a riesgos de soberanía de datos y espionaje [1]

3.2 El Factor Humano y la Cultura Organizacional

Contrario a la percepción tecnocéntrica del mercado, la revisión señala que el eslabón más débil es el ser humano y la falta de disciplina organizacional.

3.2.1 Percepción de Riesgo y Enfoque Individual (Malasia)

Un estudio cuantitativo realizado por Isa et al. (2024) en Malasia evaluó el impacto de las amenazas cibernéticas en las partes interesadas (stakeholders). Utilizando el **Índice de Importancia Relativa (RII)**, los encuestados clasificaron la “mejora de la seguridad del sitio de construcción” como el segundo beneficio más alto de la tecnología (RII Ranking 2). Sin embargo, paradójicamente, los hallazgos mostraron que los sistemas de ciberseguridad corporativos son “poco profundos”. La industria no se percibe como un objetivo principal de ataques, lo que lleva a una estrategia de defensa basada en el “enfoque individual”: la seguridad depende de que cada empleado actualice su antivirus personal, una medida insuficiente ante amenazas avanzadas [11]

3.2.2 Privacidad y Resistencia al Monitoreo (Nueva Zelanda)

La resistencia cultural también se manifiesta en el sitio de obra. Wu et al. (2022) realizaron una encuesta en Nueva Zelanda (N=236 participantes) sobre la adopción de Tecnologías de Monitoreo de Empleados en Tiempo Real (REMT). Los resultados mostraron una preparación moderada-alta: la afirmación “Creo que el monitoreo de empleados aumenta la eficiencia” obtuvo el puntaje medio más alto (**5.18 sobre 7**). No obstante, al aplicar la Teoría de Gestión de la Privacidad de la Comunicación (CPM), se detectó una barrera significativa: la falta de comprensión sobre cómo se protegen los datos recolectados genera desconfianza. Sin protocolos claros de anonimización, los trabajadores perciben el monitoreo como una herramienta de control punitivo más que de seguridad [12]

3.2.3 La Amenaza de Terceros (Reino Unido)

Profundizando en la dinámica interna, Badi y Nasaj (2024) aplicaron el modelo **McKinsey 7S** en firmas del Reino Unido. Su análisis estadístico jerarquizó los elementos que más influyen en la efectividad de la ciberseguridad. Los resultados destacaron que, más allá del “hard-

ware” o “software”, las “**Relaciones con Terceros**” y el “**Cumplimiento Normativo**” son los factores críticos de éxito. Esto valida que en la construcción, donde la subcontratación es la norma, la seguridad de una empresa principal es tan vulnerable como la de su subcontratista menos protegido [5]

3.3 Paradojas Tecnológicas: Vulnerabilidades en Herramientas Emergentes

La investigación revela una paradoja inquietante: las mismas tecnologías diseñadas para optimizar la eficiencia del sector están introduciendo vulnerabilidades críticas debido a una implementación que prioriza la funcionalidad operativa sobre la seguridad de la información.

3.3.1 Inteligencia Artificial Generativa (ChatGPT)

La irrupción de la Inteligencia Artificial Generativa ha marcado un nuevo hito de vulnerabilidad. Herramientas como ChatGPT se han integrado rápidamente en tareas administrativas y de gestión de proyectos. Sin embargo, según el análisis bibliométrico de Sonkory y García de Soto (2025), existen algunos riesgos especiales para la privacidad. Se identificaron tres grupos de riesgo principales al examinar la coocurrencia de términos:

1. Grupo Rojo (Privacidad y Ética): riesgos de acceso no autorizado y filtración de información cuando los modelos se entrenan con detalles confidenciales de proyectos [6].
2. Grupo Verde (Ciberataques y Vulnerabilidades): la IA puede crear código malicioso (malware) y ser utilizada para llevar a cabo tipos más avanzados de ataques de ingeniería social [6].
3. Grupo Azul (Sesgo y Precisión): Inevitablemente, problemas de “alucinaciones” (información falsa generada con confianza) que conducen a errores en la toma de decisiones técnicas [6].

Los autores concluyen que la falta de transparencia en cómo se procesan los datos de los usuarios convierte a estas herramientas en una “caja negra” de riesgo para la propiedad intelectual [6].

3.3.2 Contratos Inteligentes: Potenciales vs. Barreras (Caso Arabia Saudita)

Por otro lado, los contratos inteligentes (Smart Contracts) basados en Blockchain se presentan como la solución para automatizar pagos y reducir conflictos. Sin embargo, un estudio cuantitativo en el mercado de la construcción de Arabia Saudita muestra una realidad compleja. Alfalah et al. (2024) encuestaron a 50 profesionales y encontraron que, aunque el 85.2% está de acuerdo en que el IoT es una tecnología importante para facilitar estos contratos, persisten 19 barreras significativas [7].

Entre ellas, destacan las “preocupaciones por la ciberseguridad” y la fiabilidad de los datos en sistemas distribuidos. La inmutabilidad del Blockchain es una ventaja, pero si el código del contrato tiene vulnerabilidades, los fondos del proyecto pueden quedar comprometidos irreversiblemente, generando resistencia entre los actores del sector [7].

3.4 Marcos de Solución y Estrategias de Mitigación

Frente a este panorama de amenazas, la revisión de literatura arroja propuestas concretas que permiten transitar del diagnóstico a la acción, validadas mediante casos de estudio y modelos matemáticos.

3.4.1 Estandarización de Reportes: Validación del Modelo CISS

Uno de los hallazgos más pragmáticos es la validación del modelo de Escala de Gravedad de Incidentes de Ciberseguridad (CISS). Yao, Mantha y García de Soto (2025) aplicaron este modelo a un caso de estudio real: un incidente de phishing en una empresa de ingeniería y contratación en los Emiratos Árabes Unidos, durante un proyecto comercial de 5 millones de dólares [8].

El modelo permitió calcular un puntaje de severidad exacto de 1.95 (en una escala de 0 a 10), derivado de la siguiente ponderación:

$$CISS = 0.9 \times Severidad + 0.1 \times Criticalidad$$

El análisis desglosó el impacto en tres dimensiones: Individual (Puntaje 1.5), Financiero (Puntaje 0, debido a la contención rápida) y Operativo (Puntaje 5, por la interrupción de tareas) [8].

Esta cuantificación demuestra que el CISS es una herramienta viable para estandarizar reportes y comparar la gravedad de incidentes entre diferentes organizaciones.

3.4.2 Automatización: Machine Learning y Explicabilidad (SHAP)

Dada la escasez de expertos en ciberseguridad en las constructoras, la automatización es necesaria. Yao y García de Soto (2024) desarrollaron un marco de 6 módulos que integra técnicas de Aprendizaje Automático (Machine Learning) para identificar y estimar riesgos cibernéticos automáticamente [10].

El modelo utiliza Redes Neuronales Artificiales (ANN) como motor de predicción. Una innovación clave es la incorporación del análisis de valores SHAP (SHapley Additive exPlanations) para la priorización de factores de riesgo [10]. Esta técnica permite “abrir la caja negra” de la IA y cuantificar la contribución exacta de cada variable (ej. falta de capacitación, software obsoleto) a la predicción de riesgo, proporcionando a los gerentes una lista priorizada para la mitigación proactiva.

3.4.3 Defensa Colectiva: El Modelo ISAC (Caso Noruega)

Lo más importante es que se trata de trabajar juntos. Una investigación empírica en Noruega muestra que, aunque el sector puede carecer de fondos suficientes para un Equipo de Respuesta a Emergencias (CERT) especializado y dedicado exclusivamente a la construcción, existe una necesidad urgente de formar foros de intercambio de información. Skytterholm y Jaatun (2023) han demostrado que los actores de la industria buscan facilitar el intercambio de conocimientos sobre amenazas para mejorar su defensa colectiva, con énfasis en el establecimiento de un Centro de Intercambio y Análisis de Información (ISAC) [13].

4. Conclusiones

Este trabajo ha facilitado la identificación de la crisis de ciberseguridad en la industria inmobiliaria y de la construcción, mapeando un pano-

rama de riesgo sistémico para el éxito de la transformación digital. Las siguientes conclusiones clave se derivan de la revisión del trabajo científico más reciente:

Primera: La brecha de madurez es estructural. También está claro que la construcción se está llevando a cabo con un agujero de seguridad mucho más denso que la manufactura. Esta falta de estándares uniformes en herramientas vitales como los Gemelos Digitales y los Pasaportes de Materiales significa que la propiedad intelectual se convierte en objeto de riesgo de espionaje industrial. El sector necesita acelerar la transición hacia hardware seguro y unificar los protocolos de datos para mitigar esta brecha.

Segundo: este es un riesgo humano y organizacional. La tecnología avanza más rápido que la cultura de seguridad. La percepción del riesgo es baja (como se ve en Malasia), y la seguridad se atribuye erróneamente a la responsabilidad individual. Pero la gestión de la cadena de suministro es su punto ciego: la seguridad de una empresa central es tan sensible como la de sus subcontratistas.

Tercero: La gobernanza es crítica para la innovación. Herramientas como ChatGPT y los Contratos Inteligentes aumentan la eficiencia, pero tienen vectores de ataque previamente no detectados: privacidad y vulnerabilidades de código. Toda su adopción debe ir de la mano con marcos de gobernanza de datos desde su fase de diseño (Privacidad desde el Diseño).

Cuarta: La solución es la estandarización y la defensa colectiva. Finalmente, se concluye que la importación de soluciones genéricas de TI es ineficaz. La industria requiere adoptar marcos específicos como el modelo CISS para métricas objetivas y algoritmos de Machine Learning para la predicción de riesgos. Además, es imperativo transitar hacia un modelo colaborativo (ISAC), entendiendo que la ciberseguridad no es una ventaja competitiva individual, sino un requisito sistémico para la sostenibilidad de la Construcción 4.0.

3. Referencias

- [1] A. Salykov, U. Z. Shalbolova, y A. Junusova, «Transformation in Kazakhstan's construction industry amidst digitalisation of the economy», Infrastructure Asset Management. ICE Publishing, 2024. doi: 10.1680/jinam.24.00037.
- [2] F. H. Abanda, N. Jian, S. E. Adukp, V. V. Tuhaise, y M. Blanche Manjia, «Digital twin for product versus project lifecycles' development in manufacturing and construction industries», Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 36, n.o 2. Springer, pp. 801-831, 2025. doi: 10.1007/s10845-023-02301-2.
- [3] Ž. Turk, B. García de Soto, B. R. K. Mantha, A. MacIel, y A. Georgescu, «A systemic framework for addressing cybersecurity in construction», Automation in Construction, vol. 133. Elsevier B.V., 2022. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103988.

- [4] N. K. Bús y Z. Nyíkes, «Cyber Security Challenges in Construction», *Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*, vol. Part F2433. Springer, pp. 509-518, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-47990-8_44.
- [5] S. M. Badi y M. Nasaj, «Cybersecurity effectiveness in UK construction firms: an extended McKinsey 7S model approach», *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 31, n.o 11. Emerald Publishing, pp. 4482-4515, 2024. doi: 10.1108/ECAM-12-2022-1131.
- [6] M. S. Sonkor y B. García de Soto, «Using ChatGPT in construction projects: unveiling its cybersecurity risks through a bibliometric analysis», *International Journal of Construction Management*, vol. 25, n.o 7. Taylor and Francis Ltd., pp. 741-749, 2025. doi: 10.1080/15623599.2024.2355782.
- [7] G. Alfalah, A. Al-Sakkaf, E. Mohammed Abdelkader, S. Rawdhan, M. E. Shaawat, y O. S. D. Alshamrani, «Studying Potentials and Barriers of Successful Implementation of Smart Contracts in Saudi Arabia's Construction Industry», *Advances in Civil Engineering*, vol. 2024, n.o 1. John Wiley and Sons Ltd, 2024. doi: 10.1155/adce/9646556.
- [8] D. Yao, B. R. K. Mantha, y B. G. de Soto, «Implementation of the Cybersecurity Incident Severity Scale (CISS) to Assess Cyber Incidents in the Construction Sector», *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC)*, pp. 657-664, 2025. doi: 10.22260/ISARC2025/0086.
- [9] S. D. Siriwardhana, R. C. Moehler, y Fang, «Exploring the Determinants of Construction 4.0 Implementation in Australian Construction Industry: A SWOT Analysis», *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 591 LNCE. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 830-841, 2025. doi: 10.1007/978-981-96-4051-5_80.
- [10] D. Yao y B. García de Soto, «Integrating Machine Learning for Cyber Risk Analysis in Construction 4.0», *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 629 LNCE. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 76-91, 2025. doi: 10.1007/978-3-031-87364-5_7.
- [11] R. Isa, H. E. A. Baharuddin, y A. F. Othman, «Impacts of Cybersecurity Threats on Construction Stakeholders in Malaysia Amidst Industrial Revolution 4.0», *Built Environment Journal*, vol. 21, n.o S1. MARA University of Technology, pp. 49-58, 2024. doi: 10.24191/bej.v21iS1.2445.
- [12] R. W. Wu, T. W. Yiu, y M. Babaeian Jelodar, «Real-time Employee Monitoring Technologies in the Construction Sector - Effect, Readiness and Theoretical Perspectives: The case of New Zealand», *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1101, n.o 8. Institute of Physics, 2022. doi: 10.1088/1755-1315/1101/8/082010.
- [13] A. N. Skytterholm y M. G. Jaatun, «Exploring the Need for a CERT for the Norwegian Construction Sector», *Springer Proceedings in Complexity*. Springer Science and Business Media B.V., pp. 57-73, 2023. doi: 10.1007/978-981-19-6414-5_4.



REVISTA INGENIO

De la Construcción 4.0 a la Construcción 5.0: Marco de transición hacia una innovación sostenible en Ecuador

From Construction 4.0 to Construction 5.0: A Sustainable Transition Framework for Ecuador

Andrea Cristina Goyes Balladares | Universidad Técnica de Ambato, UTA Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica (Ecuador)

Roberto Carlos Moya Jiménez | Universidad Central del Ecuador, UCE Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (Ecuador)

Lourdes Gabriela Peñafiel Valla | Universidad Técnica de Ambato, UTA Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica (Ecuador)

Recepción: 30/10/2025

Recepción tras revisión: 29/04/2026

Aceptado: 15/07/2026

Publicado: 31/07/2026

PALABRAS CLAVE

Construcción 4.0; Construcción 5.0; transformación digital; sostenibilidad; diseño centrado en el ser humano.

KEY WORDS

Construction 4.0; Construction 5.0; Digital transformation; Sustainability; Human-centered design.

RESUMEN

La transformación digital del sector de la construcción ha impulsado la emergencia de dos paradigmas interrelacionados: la Construcción 4.0, basada en la automatización y el uso de tecnologías ciberfísicas, y la Construcción 5.0, orientada a la sostenibilidad y la centralidad humana. Este estudio realiza una revisión sistemática narrativa con enfoque comparativo, siguiendo las directrices PRISMA 2020, a partir de un corpus de 38 estudios seleccionados entre 2015 y 2025. Los resultados evidencian que la Construcción 4.0 ha alcanzado altos niveles de madurez tecnológica (TRL 7–9), con avances en productividad, eficiencia y seguridad laboral, pero mantiene limitaciones en sostenibilidad y desarrollo humano. En contraste, la Construcción 5.0 se encuentra en una fase emergente (TRL 3–6), priorizando la colaboración humano-máquina, la economía circular y la ética digital. A partir de estas diferencias, se propone un framework de transición hacia la Construcción 5.0 sostenible en Ecuador, estructurado en cuatro ejes interdependientes: tecnológico, humano, ambiental y político-institucional. Este marco busca orientar políticas, estrategias y procesos de innovación en el contexto latinoamericano, articulando la digitalización con el bienestar social y la sostenibilidad ambiental. Los resultados aportan una visión integral para acelerar la transformación digital sostenible del sector de la construcción en países en desarrollo.

ABSTRACT

The digital transformation of the construction sector has given rise to two interconnected paradigms: Construction 4.0, driven by automation and cyber-physical technologies, and Construction 5.0, focused on sustainability and human-centered innovation. This study conducts a systematic narrative review with a comparative approach, following the PRISMA 2020 guidelines, based on a corpus of 38 studies published between 2015 and 2025. The findings reveal that Construction 4.0 has reached high technological maturity levels (TRL 7–9), achieving significant improvements in productivity, efficiency, and occupational safety, yet remaining limited in social and environmental integration. Conversely, Construction 5.0 is at an early stage (TRL 3–6), emphasizing human-machine collaboration, circular economy practices, and digital ethics. Building upon these insights, a transition framework toward Sustainable Construction 5.0 in Ecuador is proposed, structured around four interdependent dimensions: technological, human, environmental, and policy-institutional. The framework aims to guide public policies, innovation strategies, and digital adoption processes in the Latin American context, linking digital transformation with human well-being and environmental sustainability. The study contributes an integrative perspective to accelerate the sustainable digital transition of the construction sector in developing countries.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es uno de los sectores productivos con mayor rezago en productividad y digitalización a nivel global. Mientras la manufactura ha experimentado notables avances gracias a la automatización y la adopción de tecnologías digitales, la construcción ha mostrado un crecimiento de productividad promedio de apenas un 1% anual en las últimas dos décadas, frente al 2,8% de la economía mundial [1]. Esta brecha estructural ha evidenciado la necesidad de nuevos paradigmas tecnológicos

capaces de transformar la forma en que se diseñan, planifican y ejecutan los proyectos, promoviendo eficiencia, sostenibilidad y resiliencia en un entorno crecientemente urbano y digital [2], [3].

En este contexto, la Construcción 4.0 emerge como la adaptación de los principios de la Industria 4.0 al ámbito constructivo, fundamentada en la digitalización, el uso de datos masivos, la inteligencia artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT), la robótica y la automatización de procesos [4], [5]. Su implementación se asocia con beneficios tangibles en productividad, sostenibilidad y seguridad laboral

[6], [7] sin embargo, enfrenta desafíos persistentes como los altos costos iniciales, la falta de interoperabilidad entre plataformas digitales, la escasa estandarización de datos y la resistencia cultural al cambio (Li et al., 2021; Gbadamosi et al., 2019). La literatura reciente coincide en que estos obstáculos son aún más pronunciados en países en desarrollo, donde la brecha tecnológica y la ausencia de políticas públicas efectivas ralentizan la adopción [8]–[10].

En los últimos años, la literatura ha introducido el concepto de Construcción 5.0, inspirado en el marco de la Industria 5.0 promovido por la Comisión [11]. Este nuevo enfoque busca integrar los avances de la digitalización con un énfasis en la centralidad del ser humano y la sostenibilidad ambiental, promoviendo una colaboración armónica entre trabajadores y sistemas inteligentes, así como la incorporación de principios de economía circular y resiliencia urbana [12], [13]. Aunque su desarrollo aún es incipiente, plantea un horizonte transformador que supera la mera eficiencia operativa de la etapa anterior [14]. Sin embargo, persisten vacíos de investigación, especialmente en regiones emergentes como América Latina, donde la adopción de tecnologías de la Construcción 4.0 sigue siendo desigual y la discusión sobre la 5.0 es prácticamente inexistente [15]. Frente a ello, el presente artículo tiene como objetivo analizar comparativamente los enfoques de la Construcción 4.0 y 5.0, identificando sus potencialidades, limitaciones y niveles de madurez tecnológica, para proponer un framework de transición sostenible que sirva de referencia para la transformación del sector constructivo en contextos latinoamericanos, con especial atención al caso ecuatoriano.

2. MÉTODO

El estudio se desarrolló bajo un diseño de revisión sistemática narrativa con enfoque comparativo, orientado a examinar críticamente la literatura sobre los paradigmas de Construcción 4.0 y Construcción 5.0. Este diseño combinó la estructura rigurosa de la revisión sistemática con la interpretación analítica propia de la revisión narrativa, permitiendo integrar resultados conceptuales, técnicos y contextuales.

El procedimiento se realizó conforme a las directrices PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), garantizando transparencia, trazabilidad y reproducibilidad en cada etapa. El proceso metodológico incluyó cuatro fases principales:

- 1) Delimitación del problema y formulación de preguntas de revisión
- 2) Búsqueda bibliográfica y recopilación de fuentes
- 3) Cribado y selección de estudios
- 4) Codificación, análisis y validación de resultados.

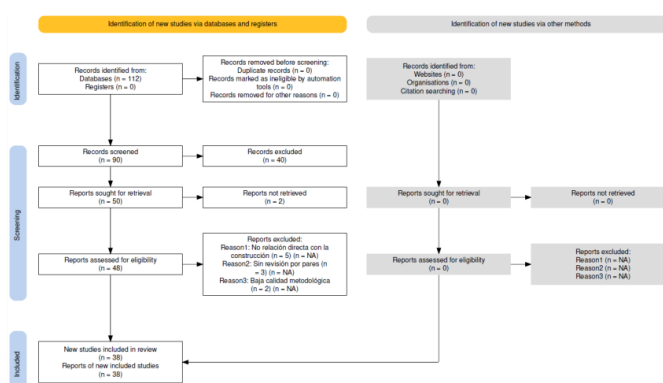
La búsqueda se efectuó entre enero y agosto de 2025 en las bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect y SpringerLink, considerando el periodo 2015–2025. Se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés y español mediante operadores booleanos (AND/OR): “Construction 4.0”, “Construction 5.0”, “BIM”, “IoT”, “Artificial Intelligence” y “Sustainability”. Además, se revisaron documentos institucionales de la European Commission (2021), la OECD (2023) y el World Economic Forum (2024) para contextualizar

las tendencias globales en digitalización y sostenibilidad industrial.

Los criterios de inclusión consideraron publicaciones revisadas por pares, en inglés o español, con texto completo disponible y relación directa con digitalización, automatización o sostenibilidad en la construcción. Se excluyeron duplicados, literatura gris y estudios sin rigor metodológico. En total se identificaron 112 registros; tras eliminar 22 duplicados, se examinaron 90. De estos, 40 fueron descartados por falta de pertinencia. Se recuperaron 50 informes completos, de los cuales 2 no pudieron obtenerse, quedando 48 evaluados. Finalmente, 38 estudios fueron incluidos (27 de Construcción 4.0 y 11 de Construcción 5.0). El proceso completo se muestra en la Figura 1, elaborada según el diagrama oficial PRISMA 2020.

Fig. 1.

Diagrama de flujo PRISMA 2020 que muestra el proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de los estudios analizados (n = 38) [16].



El análisis cualitativo se realizó mediante codificación temática abierta y axial, asistida por software especializado para la organización y jerarquización de datos. Se establecieron diez ejes analíticos derivados del proceso de codificación: (1) objetivo estratégico, (2) base tecnológica, (3) modelo de trabajo, (4) resultados esperados, (5) limitaciones, (6) impacto en la fuerza laboral, (7) nivel de adopción global, (8) horizonte temporal, (9) nivel de madurez tecnológica (TRL) y (10) nivel de adopción en América Latina. Los valores de madurez tecnológica oscilaron entre TRL 3 y 9, según la escala propuesta por la European Commission (2021). La validación de resultados se llevó a cabo mediante triangulación teórica, revisión inter pares y contraste contextual con estudios latinoamericanos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis del corpus de treinta y ocho estudios seleccionados evidenció la evolución conceptual y tecnológica del sector de la construcción durante la última década. El examen se organizó según los diez ejes analíticos definidos en el método, lo que permitió comparar los paradigmas de Construcción 4.0 y 5.0 en términos de objetivos estratégicos, base tecnológica, modelos de trabajo, resultados esperados y nivel de madurez tecnológica (TRL). De los estudios analizados, el 71 % se centró en tecnologías de la Construcción 4.0 y el 29 % abordó enfoques relacionados con la 5.0, lo que

confirma el carácter aún emergente de este último.

La denominada Construcción 4.0 surge como adaptación de los principios de la Industria 4.0 al entorno constructivo, consolidando la incorporación de tecnologías ciberfísicas, inteligencia artificial (IA), big data, Internet de las Cosas (IoT), robótica y automatización [17]. Su desarrollo se consolidó a partir de 2015, cuando los primeros estudios vincularon la digitalización con la eficiencia y la productividad en proyectos de infraestructura [4], [18]. Desde entonces, este paradigma se ha asociado a la industrialización de procesos —prefabricación, modularización y construcción off-site— y a la gestión digital mediante BIM y plataformas colaborativas [5].

La literatura reporta beneficios tangibles: incremento de productividad, reducción de errores y optimización de recursos [7]. También se identifican impactos ambientales positivos derivados del monitoreo de consumos y la reducción de desperdicios [19]. En el ámbito de la seguridad, la automatización disminuye la exposición de los trabajadores a tareas de riesgo [20]. Sin embargo, su adopción enfrenta barreras significativas: altos costos iniciales, falta de interoperabilidad, resistencia cultural y déficit de capacitación digital [6], [21]. Estas limitaciones se acentúan en los países en desarrollo, donde la brecha tecnológica restringe la expansión del paradigma 4.0.

En contraste, la Construcción 5.0 propone una transformación más profunda: pasar de la eficiencia técnica al bienestar humano y la sostenibilidad como ejes del desarrollo. Inspirada en la Industria 5.0 [11], esta visión busca equilibrar automatización, creatividad y ética tecnológica [12], [13]. La innovación se orienta a generar entornos habitables sostenibles, seguros e inclusivos, integrando la colaboración entre humanos y máquinas, la economía circular y el

diseño centrado en las personas.

Los estudios revisados identifican tres ámbitos centrales:

- (1) **Colaboración humano-máquina**, mediante robots colaborativos (cobots) y dispositivos portátiles inteligentes que monitorean seguridad y bienestar [14], [22].
- (2) **Sostenibilidad y economía circular**, apoyadas en gemelos digitales e IA cognitiva que optimizan recursos y reducen la huella ambiental [23].
- (3) **Personalización constructiva**, basada en diseño digital y simulación avanzada para infraestructuras adaptadas a contextos específicos [13].

A pesar de su potencial, la madurez tecnológica de la Construcción 5.0 se mantiene en niveles TRL 3–6, con vacíos en estandarización, regulación y formación profesional. También emergen desafíos éticos relacionados con la privacidad, el uso de datos y el desplazamiento laboral [14]. En consecuencia, la transición entre ambos paradigmas no es lineal, sino que implica reconfigurar la cultura organizacional y redefinir el papel del ser humano en la construcción digital.

El análisis comparativo de la Tabla 2 demuestra que la Construcción 4.0 constituye un paradigma tecnológicamente consolidado pero limitado en su dimensión social y ambiental, mientras que la 5.0 representa un modelo emergente que integra tecnología, ética y sostenibilidad, aunque con escasa madurez operativa. En el contexto latinoamericano, la adopción de la 4.0 es aún desigual: en Ecuador, por ejemplo, BIM se ha incorporado en la gestión pública y en la formación universitaria, pero la infraestructura digital y la inversión en I+D siguen siendo insuficientes para escalar hacia la 5.0.

TABLA I.

Comparación entre Construcción 4.0 y Construcción 5.0

Eje analítico	Construcción 4.0	Construcción 5.0	TRL (Madurez tecnológica)	Adopción en América Latina
(1) Objetivo estratégico	Productividad, reducción de costos, eficiencia operativa (Oesterreich & Teuteberg, 2016).	Bienestar humano, resiliencia y sostenibilidad (Nahavandi, 2019; Pal et al., 2024).	4.0: TRL 8–9 (consolidado). 5.0: TRL 4–6 (fase piloto).	4.0: Avance incipiente (BIM en proyectos públicos y privados). 5.0: Muy bajo, sin políticas definidas.
(2) Base tecnológica	BIM, IoT, Big Data, IA, robótica, impresión 3D (Forcael et al., 2020).	Cobots, gemelos digitales, blockchain, IA cognitiva, wearables, economía circular (Demir et al., 2019).	4.0: BIM TRL 9, IoT TRL 7–8. 5.0: Cobots TRL 6–7, Digital Twins TRL 5–6.	4.0: Implementación desigual; concentrada en grandes empresas. 5.0: Experiencias aisladas, baja penetración.
(3) Modelo de trabajo	Automatización de procesos y digitalización de la cadena de valor (Zhang et al., 2020).	Colaboración humano-máquina y diseño centrado en el usuario (Marinelli, 2023).	4.0: TRL 8 (modelos probados). 5.0: TRL 4–5 (conceptual/piloto).	4.0: En adopción parcial, limitada por brecha digital. 5.0: No consolidado, dependencia tecnológica externa.
(4) Resultados esperados	Reducción de tiempos, errores y accidentes; eficiencia energética [5]	Personalización, resiliencia urbana y reducción de huella ambiental (Yitmen et al., 2023).	4.0: TRL 7–9 (impacto probado). 5.0: TRL 4–6 (impacto en validación).	4.0: Aumento de productividad en proyectos piloto. 5.0: Sin evidencias empíricas significativas.

(5) Limitaciones	Altos costos, falta de interoperabilidad, resistencia cultural [24], [25].	Baja madurez, falta de talento, dilemas éticos y regulatorios (Demir et al., 2019).	4.0: TRL 8-9 (limitaciones socioeconómicas). 5.0: TRL 3-5 (limitaciones técnicas y sociales).	4.0: Implementación restringida a grandes corporaciones. 5.0: Barreras estructurales (financiamiento, políticas públicas).
(6) Impacto en la fuerza laboral	Riesgo de desplazamiento de trabajadores manuales (McKinsey Global Institute, 2017).	Reconversión laboral y capacitación avanzada para interacción humano-robot (Wang et al., 2023).	4.0: TRL 8 (impacto comprobado). 5.0: TRL 4-6 (en desarrollo).	4.0: Baja capacitación digital. 5.0: Escasez de programas de formación.
(7) Nivel de adopción global	Europa, EE. UU. y China con aplicaciones consolidadas (Forcael et al., 2020).	Pilotos en Japón, Corea y países nórdicos (Pal et al., 2024).	4.0: TRL 8-9. 5.0: TRL 4-6.	4.0: Expansión incipiente. 5.0: Sin casos documentados relevantes.
(8) Horizonte temporal	Presente consolidado (aplicación real en proyectos).	Futuro emergente (visión prospectiva).	4.0: TRL 9. 5.0: TRL 4-5.	4.0: Proceso de expansión con brechas. 5.0: Lejano, dependiente de políticas y capacidades.
(9) Nivel de madurez tecnológica	Tecnologías maduras y aplicadas en escala industrial.	Tecnologías experimentales y adaptativas.	4.0: Promedio TRL 8.5. 5.0: Promedio TRL 4.5.	4.0: Avance medio. 5.0: Escaso desarrollo institucional.
(10) Nivel de adopción en América	Uso extendido de BIM y plataformas colaborativas en proyectos públicos.	Implementación incipiente de IA y gemelos digitales.	4.0: TRL 7-8 (en consolidación). 5.0: TRL 3-4 (fase de experimentación).	4.0: Avances en Chile, México y Ecuador. 5.0: Sin adopción formal o estandarización.

En síntesis, los resultados confirman que la Construcción 4.0 ha impulsado eficiencia y precisión, pero no ha logrado integrar plenamente la dimensión humana y ambiental que promueve la 5.0. El desafío regional consiste en diseñar una transición sostenible que combine innovación tecnológica, equidad social y sostenibilidad ambiental, fortaleciendo la formación técnica, las políticas públicas y la cooperación entre academia, industria y gobierno. Este proceso constituye la base del framework de transición hacia la Construcción 5.0 sostenible, presentado en la siguiente sección.

FRAMEWORK DE TRANSICIÓN HACIA LA CONSTRUCCIÓN 5.0 SOSTENIBLE EN ECUADOR

Los resultados obtenidos evidencian que la transición hacia la Construcción 5.0 no puede concebirse como una simple actualización tecnológica, sino como un proceso integral de transformación que abarca dimensiones técnicas, sociales, ambientales y políticas.

A partir de la síntesis del corpus analizado y de los vacíos identificados en el contexto latinoamericano, se propone un framework metodológico de transición sostenible, concebido como una herramienta orientadora para vincular la innovación digital con el bienestar humano y la sostenibilidad ambiental en el sector de la construcción ecuatoriano.

Este marco parte de una idea central: la tecnología no sustituye al ser humano, sino que amplifica su capacidad de decisión y colaboración. Bajo esta premisa, la Construcción 5.0 se estructura en torno a cuatro ejes interdependientes —tecnológico, humano, ambiental y político-institucional— que actúan de manera articulada, configurando un modelo sistémico de innovación sostenible.

El eje tecnológico constituye la base del framework y se orienta al fortalecimiento de la infraestructura digital y de los procesos de innovación aplicada. Incluye la adopción progresiva de herramientas como BIM de quinta generación, gemelos digitales, IA aplicada a la planificación de obra, y sistemas IoT para monitoreo energético y estructural. Este eje enfatiza la necesidad de pasar de una digitalización fragmentada a una integración inteligente de datos, garantizando interoperabilidad y escalabilidad tecnológica. En el caso ecuatoriano, ello requiere políticas de estandarización, inversión en conectividad y la creación de laboratorios nacionales de innovación en construcción, capaces de validar tecnologías emergentes adaptadas a la realidad local.

El eje humano pone el foco en las personas, promoviendo la formación de competencias digitales, la alfabetización tecnológica y el desarrollo de habilidades blandas vinculadas a la creatividad, la ética y el trabajo colaborativo. La transición hacia el modelo 5.0 exige reconvertir los perfiles laborales, incorporando la intera-

cción humano-robot y la gestión avanzada de datos como parte de la formación técnica y universitaria. La capacitación continua y los programas de certificación digital deben consolidarse como pilares de un nuevo ecosistema laboral inclusivo y resiliente, donde la tecnología se perciba como una extensión del trabajo humano, no como su reemplazo.

El **eje ambiental** refuerza la dimensión sostenible del modelo. Las tecnologías digitales deben orientarse a reducir el impacto ecológico del ciclo de vida de los proyectos mediante el uso de materiales reciclables, el diseño pasivo y la integración de energías renovables. La incorporación de metodologías de análisis de ciclo de vida (LCA) y de economía circular permite transformar la manera en que se planifican, construyen y operan las infraestructuras. En este sentido, la digitalización actúa como un facilitador para cuantificar impactos, modelar escenarios y tomar decisiones con base en evidencia ambiental. En el contexto ecuatoriano, donde la construcción genera un alto porcentaje de residuos sólidos urbanos, esta perspectiva representa una oportunidad estratégica para alinear el desarrollo urbano con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9, 11 y 13).

Finalmente, el **eje político-institucional** da soporte al marco propuesto, estableciendo las condiciones estructurales que permiten la adopción efectiva del paradigma 5.0. Incluye la creación de políticas públicas que incentiven la investigación aplicada, la innovación tecnológica y la sostenibilidad constructiva, junto con marcos regulatorios que garanticen transparencia, ética de datos y responsabilidad ambiental. Asimismo, promueve la cooperación entre el sector público, la academia y la industria para consolidar ecosistemas de innovación locales. La experiencia internacional demuestra que los países que han avanzado hacia la Construcción 5.0—como Japón, Corea del Sur o Finlandia—lo han hecho gracias a políticas integradas de innovación y a la colaboración multisectorial. Replicar estas estrategias en Ecuador requerirá visión a largo plazo y una gobernanza capaz de articular conocimiento, financiamiento y desarrollo tecnológico.

El framework propuesto no pretende ser un modelo cerrado, sino una estructura flexible que puede adaptarse a distintos niveles de madurez tecnológica y social. Su principal aporte radica en conectar el proceso de digitalización con la dimensión humana y ecológica de la construcción, superando el enfoque puramente instrumental de la Construcción 4.0. En lugar de medir el progreso solo en términos de productividad, este modelo busca evaluar el desarrollo del sector en función de su contribución al bienestar colectivo, la equidad laboral y la resiliencia ambiental.

La implementación gradual de este marco en Ecuador podría materializarse en tres etapas complementarias: una primera de diagnóstico y alfabetización digital en empresas y universidades; una segunda de integración tecnológica con estándares de sostenibilidad; y una tercera de institucionalización, en la que se generen normativas, incentivos y certificaciones vinculadas a la Construcción 5.0 sostenible. De esta forma, el país podría consolidar una transición ordenada y contextualizada, fortaleciendo su capacidad de innovación y su competitividad en el ámbito regional.

En definitiva, el framework aquí propuesto articula una visión de futuro en la que la construcción ecuatoriana evoluciona desde un modelo de eficiencia industrial hacia uno de inteligencia colectiva y

sostenibilidad integral. Este enfoque reconoce que el verdadero progreso no reside en la adopción indiscriminada de tecnología, sino en su apropiación crítica y estratégica al servicio de las personas y del entorno.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones derivan del análisis comparativo de treinta y ocho estudios internacionales y regionales que exploraron los enfoques de Construcción 4.0 y 5.0, confirmando que el sector de la construcción se encuentra en una etapa de inflexión histórica. La Construcción 4.0 logró instaurar un ecosistema digital orientado a la eficiencia operativa, aunque sus fundamentos permanecen centrados en la productividad y la automatización. En contraste, la Construcción 5.0 emerge como una respuesta crítica y evolutiva que trasciende la lógica instrumental para situar al ser humano, la ética tecnológica y la sostenibilidad ambiental en el centro del desarrollo industrial. Este giro redefine tanto la naturaleza del trabajo en la construcción como la manera en que se conciben la innovación y el progreso en el siglo XXI, evidenciando que la digitalización por sí sola no garantiza transformación estructural.

Uno de los hallazgos más relevantes del estudio es que la madurez tecnológica, sin el acompañamiento de políticas inclusivas, educación tecnológica y responsabilidad ambiental, tiende a reproducir las mismas desigualdades que pretende resolver. En el contexto latinoamericano, y particularmente en Ecuador, la transición hacia un modelo 5.0 exige más que inversión en hardware o software: requiere un cambio cultural y epistemológico que reconozca el valor del conocimiento, la cooperación interinstitucional y la innovación social como motores de desarrollo sostenible. La brecha ya no es solo digital, sino también cognitiva, entre quienes comprenden la tecnología como medio para el bienestar común y quienes la conciben únicamente como una herramienta de eficiencia productiva.

El framework de transición sostenible propuesto constituye la principal contribución de esta investigación. Su estructura sistémica—basada en los ejes tecnológico, humano, ambiental y político-institucional—ofrece un modelo replicable que vincula la innovación digital con la equidad social y la sostenibilidad ecológica. En el plano académico, amplía la comprensión del fenómeno de digitalización constructiva al integrar dimensiones éticas y territoriales poco abordadas; en el plano práctico, proporciona una ruta estratégica para que los actores del sector—gobierno, academia e industria—transformen la digitalización en bienestar colectivo. Los resultados demuestran, además, que la Construcción 5.0 no constituye un horizonte lejano, sino una oportunidad inmediata para redefinir la competitividad del sector desde la inteligencia colectiva, lo que implica revisar los indicadores de éxito y sustituir métricas exclusivamente productivas por aquellas que evalúen resiliencia, inclusión y bienestar.

Ecuador posee condiciones favorables para liderar este proceso en la región andina, siempre que logre articular su agenda de innovación tecnológica con políticas urbanas sostenibles y programas de educación superior orientados al conocimiento aplicado. En definitiva, esta investigación posiciona a la Construcción 5.0

no solo como una tendencia tecnológica, sino como una nueva cultura del construir, en la que la integración entre personas, datos y sostenibilidad redefine los límites de la arquitectura y la ingeniería contemporánea. Este giro —de la automatización a la humanización— marca el inicio de una etapa en la que la tecnología deja de ser un fin y se convierte en un medio para alcanzar bienestar, justicia y equilibrio ambiental. A futuro, el framework propuesto puede servir como base para investigaciones empíricas, políticas públicas y estrategias de innovación, consolidando el tránsito hacia una construcción verdaderamente sostenible y centrada en las personas.

REFERENCIAS

- [1] McKinsey Global Institute., “Reinventing Construction: a Route To Higher Productivity,” 2017. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business-functions/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution/mgi-reinventing-construction-a-route-to-higher-productivity-full-report.pdf>.
- [2] A. Sawhney, M. Riley, and J. Irizarry, *Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment*. Routledge, Taylor & Francis Group, 2020.
- [3] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, and S. T. Newman, “Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review,” *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 616–630, 2017, doi: 10.1016/j.ENG.2017.05.015.
- [4] E. Forcael, I. Ferrari, and A. Opazo-vega, “Construction 4.0: A Literature Review,” 2020.
- [5] T. D. Oesterreich and F. Teuteberg, “Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry,” *Comput. Ind.*, vol. 83, no. January, pp. 121–139, 2016, doi: 10.1016/j.compind.2016.09.006.
- [6] B. Dave, A. Buda, A. Nurminen, and K. Främling, “A framework for integrating BIM and IoT through open standards,” *Autom. Constr.*, vol. 95, no. August, pp. 35–45, 2018, doi: 10.1016/j.aut-con.2018.07.022.
- [7] A. Qasem, A. H. M. Hamad, E. S. Gharaibeh, T. M. Abu-khait, Gharaibeh, and M. Falah, “Building Information Modelling (BIM) in Managing Construction Claims: Now and Beyond – A Review (Jordan Perspective),” *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 9, no. 7, pp. 1099–1115, 2020, doi: 10.35940/ijitee.a2551.059720.
- [8] O. Bongomin et al., “Industry 4.0 Disruption and Its Neologisms in Major Industrial Sectors: A State of the Art,” *J. Eng. (United Kingdom)*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8090521.
- [9] Nirmani I.A.P., “Barriers to digital participation in developing countries: Identifying technological, social, and cultural obstacles to community involvement,” *GSC Adv. Res. Rev.*, vol. 23, no. 2, pp. 061–071, 2025, doi: 10.30574/gscarr.2025.23.2.0130.
- [10] G. Reischauer, “Industry 4.0 as policy-driven discourse to institutionalize innovation systems in manufacturing,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 132, no. March, pp. 26–33, 2018, doi: 10.1016/j.techfore.2018.02.012.
- [11] European Commission, “Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry,” 2021. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/468a892a-5097-11eb-b59f-01aa75ed71a1/>.
- [12] S. Nahavandi, “Industry 5.0,” *Sustainability*, vol. 11, pp. 43–71, 2019.
- [13] U. K. Pal, C. Zhang, T. C. Haupt, H. Li, and L. Su, “The Evolution of Construction 5.0: Challenges and Opportunities for the Construction Industry,” *Buildings*, vol. 14, no. 12, pp. 1–18, 2024, doi: 10.3390/buildings14124010.
- [14] I. Yitmen, A. Almusaed, and S. Alizadehsalehi, “Investigating the Causal Relationships among Enablers of the Construction 5.0 Paradigm: Integration of Operator 5.0 and Society 5.0 with Human-Centricity, Sustainability, and Resilience,” *Sustain.*, vol. 15, no. 11, 2023, doi: 10.3390/su15119105.
- [15] D. Pamela and C. Galvez, “Assessing Digital Technology Development in Latin American Countries : Challenges, Drivers , and Future Directions,” *Digital*, 2025, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/digital5020020>.
- [16] N. R. Haddaway, M. J. Page, and L. A. Pritchard, C. C., McGuinness, “PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis,” *Campbell Syst. Rev.*, vol. 18, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>.
- [17] Y. Liao, F. Deschamps, E. de F. R. Loures, and L. F. P. Ramos, “Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 12, pp. 3609–3629, 2017, doi: 10.1080/00207543.2017.1308576.
- [18] Q. Li and J. Shi, “Dam construction 4.0,” *Shuili Fadian Xuebao/Journal Hydroelectr. Eng.*, vol. 34, no. 8, pp. 1–6, 2015, doi: 10.11660/slfdbx.20150801.
- [19] J. Y. Kim et al., “Implementation of Integrated Smart Construction Monitoring System Based on Point Cloud Data and IoT Technique,” *Sensors*, vol. 25, no. 13, pp. 1–25, 2025, doi: 10.3390/s25133997.
- [20] A. Q. Gbadamosi et al., “Offsite construction: Developing a BIM-Based optimizer for assembly,” *J. Clean. Prod.*, vol. 215, pp. 1180–1190, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.113.
- [21] C. İ. Sarioğlu, “Industry 5.0, Digital Society, and Consumer 5.0,” *Handb. Res. Perspect. Soc. Technol. Addict.*, no. June, pp. 11–33, 2023, doi: 10.4018/978-1-6684-8397-8.ch002.
- [22] M. Marinelli, “From Industry 4.0 to Construction 5.0: Exploring the Path towards Human–Robot Collaboration in Construction,” *Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 1–23, 2023, doi: 10.3390/systems11030152.
- [23] K. A. Demir, G. Döven, and B. Sezen, “Industry 5.0 and Human-Robot Co-working,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 158, pp. 688–695, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.09.104.
- [24] R. Kurt, “Industry 4.0 in Terms of Industrial Relations and Its Impacts on Labour Life,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 158, pp. 590–601, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.09.093.
- [25] W. F. Cascio and R. Montealegre, “How Technology Is Changing Work and Organizations,” *Annu. Rev. Organ. Psychol. Organ. Behav.*, vol. 3, pp. 349–375, 2016, doi: 10.1146/annurev-orgpsych-041015-062352.

