

- **Alineación temática entre publicaciones científicas en ingeniería y Scopus: una evaluación basada en Latent Dirichlet Allocation.**
- **Diseño e implementación curricular para la enseñanza de conceptos actuariales en educación media.**
- **Efecto de la interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de un arquetipo estructural con sistema combinado.**
- **Modelos VAR y Garch multivariado para la proyección del precio de las acciones de Amazon y análisis de volatilidad (2019-2023).**
- **Factores de cambio tecnológico claves para el futuro de las empresas manufactureras.**
- **Determinantes del precio de oferta de vivienda en Hermosillo: un modelo hedónico en el fraccionamiento Altares.**
- **Metodología para estimar emisiones de GEI y consumo de agua en obras civiles del sector oil & gas en Colombia.**



CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE JAVIER BOTERO ÁLVAREZ

VOCALES SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ
MANUEL GARCÍA LÓPEZ
GONZALO JIMÉNEZ ESCOBAR
MARÍA DEL ROSARIO MONTEJO PERRY
ARMANDO PALOMINO INFANTE
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI
RICARDO SALAZAR FERRO
MARIANA SANDINO ULLOA
JAIRO URIBE ESCAMILLA
JORGE ENRIQUE CLAVIJO RAMÍREZ
(representante de los profesores)
DAVID STEVEN OCHOA VÉLEZ
(representante de los estudiantes)

RECTORA MYRIAM ASTRID ANGARITA GÓMEZ

SECRETARIA GENERAL PATRICIA SALAZAR PERDOMO

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

N.º 140 - enero-abril de 2026 - Cuatrimestral - Bogotá, Colombia

ISSN 3114-9081 (en línea)

DIRECTORA PhD. ING. MÓNICA MARCELA SUÁREZ PRADILLA

COMITÉ EDITORIAL PhD. ING. LUIS DANIEL BENAVIDES NAVARRO
PhD. ING. GERALD A. CORZO PÉREZ
(Profesor Asociado IHE Delft, Países Bajos)
PhD. ING. JUAN NICOLÁS GONZÁLEZ SARMIENTO
(Postdoctoral Research KAPSARC, Arabia Saudita)
PhD. ING. ANDRÉS FELIPE GUZMÁN
(Investigador Senior. KAPSARC, Arabia Saudita)
PhD. ING. LORENA REYES-RUBIANO
(Postdoctoral Researcher, RWTH Aachen University, Alemania)

DIRECCIÓN EDITORIAL CRISTINA SALAZAR PERDOMO

EDICIÓN **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA

CORRECCIÓN DE ESTILO
ELKIN RIVERA GÓMEZ

TRADUCCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTILO EN INGLÉS
DAVID PEÑA CITA

DIRECCIÓN COMERCIAL EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE AK 45 # 205-59
TEL.: (60-1) 668 3600, EXT. 533
revista@escuelaing.edu.co
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

LA ESCUELA Y LA REVISTA NO SON RESPONSABLES DE LAS IDEAS Y CONCEPTOS EMITIDOS POR LOS AUTORES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS.
SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS ARTÍCULOS DE LA REVISTA SI SE CITAN LA FUENTE Y EL AUTOR.

5-7 / EDITORIAL

Ingeniería, datos y transformación: aproximaciones contemporáneas a los desafíos técnicos, económicos y sociales

Mónica Marcela Suárez Pradilla

9-16

Alineación temática entre publicaciones científicas en ingeniería y Scopus: una evaluación basada en Latent Dirichlet Allocation

Juan Daniel Triana Manjarrés - Wilmer Pineda-Ríos - Ana María Gómez Lamus

En este artículo se analiza la alineación temática entre las publicaciones científicas de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y las publicaciones indexadas en Scopus en el campo de la ingeniería. Para esto, se recopilieron 694 artículos del repositorio institucional y 1310 artículos de Scopus, correspondientes al periodo 2020-2024, mediante técnicas de web scraping con BeautifulSoup y automatización con Selenium.

17-25

Diseño e implementación curricular para la enseñanza de conceptos actuariales en educación media

Luz Mery Torres Lancheros - Yesid Esteban Clavijo Penagos

El objetivo de este trabajo es diseñar e implementar un currículo de matemáticas en la educación media vocacional que integre conceptos esenciales del cálculo actuarial, con el propósito de fortalecer las competencias de los estudiantes en probabilidad, estadística y matemática financiera en un colegio del municipio de Cota (Cundinamarca).

27-39

Efecto de la interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de un arquetipo estructural con sistema combinado

Jahir Roberto Rodríguez Suárez - Sandra Rocío Jerez Barbosa

La interacción suelo-estructura (ISE) puede modificar de manera significativa la respuesta sísmica de las edificaciones; sin embargo, en la práctica del diseño estructural es común asumir una condición idealizada de base fija. En el presente estudio se evalúa el efecto de la ISE en la respuesta sísmica de un arquetipo estructural con sistema combinado de pórticos y muros de concreto reforzado, diseñado con capacidad de disipación de energía moderada (DMO).

41-51

Modelos VAR y Garch multivariado para la proyección del precio de las acciones de Amazon y análisis de volatilidad (2019-2023)

María Constanza Torres Tamayo - Álvaro Hernando Chaves Castro -

Alberto Alejandro Chaparro Viracachá

En este artículo se construye y evalúa un enfoque de modelado integrado que combina un modelo VAR (vector autorregresivo) multivariado de orden 6, un modelo Garch (1,1) para la volatilidad condicional y el cálculo del valor en riesgo (VaR) mediante cuatro metodologías complementarias. El modelo VAR incorpora el PIB trimestral de Estados Unidos, el índice CPI-U y el S&P 500 como variables exógenas, proyectadas previamente mediante modelos Arima seleccionados con criterios AIC y BIC.

53-66

Factores de cambio tecnológico claves para el futuro de las empresas manufactureras

Adriana Marcela Zambrano-Sánchez - Diana Carolina Cabra-Ballesteros - Laura Camila Aponte Medina

En el presente estudio se identifican los factores de cambio tecnológico que incidirán en el desarrollo de empresas manufactureras de base tecnológica en Bogotá durante la próxima década. La investigación se desarrolló mediante un enfoque cualitativo de carácter prospectivo, con una selección de catorce expertos vinculados a las industrias priorizadas, entrevistas individuales y grupales, análisis de contenido y revisión de bibliografía especializada.

67-83

Determinantes del precio de oferta de vivienda en Hermosillo: un modelo hedónico en el fraccionamiento Altares

Gerardo Uribe-Ramírez - Marco Ramos-Corella - Juan Caro-Becerra - Jesús Quintana-Pacheco - Israel Miranda-Pasos - Israel Eduardo Miranda-Torres

En este artículo se desarrolla un modelo de precios hedónicos para estimar el valor de oferta de viviendas en el fraccionamiento Altares, en el sur de Hermosillo (Sonora). Se delimitó el área de estudio y se identificaron atributos claves, como superficie construida, superficie de terreno, número de habitaciones, baños y calidad de materiales. Con datos obtenidos de plataformas inmobiliarias y analizados en IBM SPSS Statistics 19, se construyó un modelo estadístico orientado a la estimación de precios; sin embargo, no se reportan métricas específicas de desempeño que permitan sustentar afirmaciones sobre su eficiencia o margen de error.

85-98

Metodología para estimar emisiones de GEI y consumo de agua en obras civiles del sector oil & gas en Colombia

Yecid Alberto Beltrán-Pérez - Camilo Andres Perdomo-Horta - Nancy Torres-Castellanos

En este artículo se presenta una metodología estandarizada para estimar las emisiones de CO₂ y el consumo de agua en proyectos de construcción del sector oil & gas en Colombia. La propuesta integra directrices del IPCC y el Protocolo de Kioto, incorporando principios de sostenibilidad y economía circular. A partir de la definición de actividades constructivas, medios de transporte y factores internacionales de emisión y consumo hídrico, se cuantifican en forma trazable las variables ambientales.

99 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

Ingeniería, datos y transformación: aproximaciones contemporáneas a los desafíos técnicos, económicos y sociales

MÓNICA MARCELA SUÁREZ PRADILLA

PhD. M.Sc. Gestión y Valoración Urbana de la Universidad Politécnica de Cataluña. Ing. Civil de la Universidad Nacional de Colombia. Profesora del programa de Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

ORCID 0000-0001-5864-4771 - monica.suarez@escuelaing.edu.co

La presente edición de la Revista de la Escuela Colombiana reúne una serie de trabajos de investigación que reflejan los desafíos contemporáneos de la ingeniería y las ciencias aplicadas en escenarios caracterizados por la transformación digital, la sostenibilidad, la modelación avanzada y la toma de decisiones basada en datos. Los artículos publicados evidencian la creciente necesidad de abordar problemas complejos mediante enfoques interdisciplinarios capaces de integrar herramientas analíticas, perspectivas territoriales y reflexiones críticas sobre el impacto social y ambiental del desarrollo tecnológico.

La ingeniería actual atraviesa un momento de profunda transformación metodológica y conceptual. La amplia disposición de datos, el desarrollo de herramientas computacionales avanzadas, la importancia de incorporar criterios de sostenibilidad y la necesidad de responder a entornos cada vez más inciertos han ampliado el alcance tradicional de las diferentes disciplinas. Los trabajos que contiene esta edición evidencian que la ingeniería ya no se limita a resolver problemas técnicos aislados, sino que debe ir articulada con diferentes áreas como la economía, la sostenibilidad ambiental, la gestión del riesgo, la educación y la inteligencia artificial para construir respuestas integrales frente a desafíos complejos.

En esta edición se reúnen investigaciones que, desde diversas disciplinas, comparten un interés común por la modelación, la toma de decisiones basada en evidencia y la generación de herramientas aplicadas a contextos reales. En conjunto, los trabajos evidencian cómo la ingeniería y las ciencias aplicadas están incorporando enfoques analíticos sofisticados para interpretar fenómenos urbanos, financieros, educativos, ambientales y tecnológicos.

El número inicia con el artículo *“Alineación temática entre publicaciones científicas en ingeniería y Scopus: una evaluación basada en Latent Dirichlet Allocation”*, el cual introduce una aproximación novedosa al análisis de la producción científica institucional mediante técnicas de procesamiento de lenguaje natural y modelación de tópicos. A partir de metodologías de extracción automatizada de datos web, minería de texto y modelos LDA, el estudio analiza la alineación temática de las publicaciones académicas con referentes indexados en Scopus, evidenciando el potencial de la inteligencia artificial y el análisis automatizado para fortalecer procesos de gestión del conocimiento e identificación de tendencias investigativas.

Posteriormente, el artículo *“Diseño e implementación curricular para la enseñanza de conceptos actuariales en educación media”* propone una reflexión relevante sobre innova-

ción pedagógica y formación matemática aplicada. El trabajo plantea la incorporación temprana de conceptos actuariales en la educación media como mecanismo para fortalecer competencias en probabilidad, estadística y matemática financiera, acercando a los estudiantes a contextos reales de incertidumbre y toma de decisiones cuantitativas. Su inclusión en esta posición resulta especialmente relevante, pues introduce una discusión sobre cómo la transformación del conocimiento exige nuevas estrategias formativas para preparar generaciones capaces de responder a escenarios crecientemente complejos.

Desde el campo de la ingeniería estructural, el artículo *“Efecto de la interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de un arquetipo estructural con sistema combinado”* desarrolla un análisis técnico riguroso sobre los efectos de la interacción suelo-estructura en edificaciones de concreto reforzado. Los resultados cuestionan la tradicional hipótesis de base fija frecuentemente utilizada en el diseño estructural, aportando evidencia sobre cómo la flexibilidad del sistema suelo-cimentación puede modificar significativamente la respuesta sísmica y las demandas de ductilidad estructural.

En una línea orientada hacia la modelación predictiva y el análisis financiero, el artículo *“Modelos VAR y Garch multivariado para la proyección del precio de las acciones de Amazon y análisis de volatilidad (2019–2023)”* profundiza en la aplicación de modelos econométricos y de series temporales para la gestión del riesgo en mercados financieros. El uso combinado de modelos VAR, ARCH, GARCH y metodologías VaR demuestra cómo las herramientas estadísticas avanzadas permiten interpretar escenarios de alta volatilidad e incertidumbre económica, aportando mecanismos analíticos útiles para la toma de decisiones estratégicas.

Posteriormente, el artículo *“Factores de cambio tecnológico claves para el futuro de las empresas manufactureras”* establece un marco general sobre las transformaciones tecnológicas que actualmente redefinen el entorno empresarial e industrial. Inteligencia artificial, automatización, blockchain, ciudades inteligentes, transición energética y ciencia de datos son identificadas como fuerzas de cambio que modificarán los sistemas productivos y las dinámicas de competitividad en los próximos años. Este trabajo permite contextualizar discusiones sobre innovación y posiciona el cambio tecnológico como uno de los ejes estructurales de la ingeniería contemporánea.

La discusión se desplaza posteriormente hacia el ámbito urbano y territorial con el artículo *“Determinantes del precio de oferta de vivienda en Hermosillo: un modelo hedónico en el fraccionamiento Altares”*, el cual desarrolla un modelo estadístico aplicado a la estimación de precios de vivienda en el contexto urbano mexicano. A través del análisis de variables físicas, estructurales y locacionales, el trabajo muestra cómo la modelación hedónica constituye una herramienta relevante para comprender dinámicas de valorización inmobiliaria y apoyar procesos de planificación y evaluación urbana.

Finalmente, el número cierra con el artículo *“Metodología para estimar emisiones de GEI y consumo de agua en obras civiles del sector Oil & Gas en Colombia”*, el cual propone una metodología estandarizada para cuantificar emisiones de CO₂ y consumo hídrico en proyectos civiles del sector energético. La investigación integra lineamientos internacionales y herramientas prácticas de cálculo orientadas a incorporar variables ambientales en etapas tempranas de diseño y construcción, evidenciando la necesidad de que la ingeniería contemple de manera explícita criterios de sostenibilidad y mitigación climática. Como cierre del número, este trabajo deja abierta una discusión particularmente relevante sobre el papel que tendrá la ingeniería en la transición hacia modelos de desarrollo ambientalmente responsables.

En conjunto, los trabajos publicados permiten identificar una característica transversal: la consolidación de una ingeniería profundamente relacionada con los datos, la modelación y la interdisciplinariedad. Sin embargo, también invitan a una reflexión crítica, considerando la creciente sofisticación metodológica que incluye modelos predictivos, inteligencia artificial, simulaciones avanzadas y automatización analítica que no necesariamente garantizan una comprensión integral de los problemas sociales, territoriales y ambientales. Así, existe el riesgo de que la fascinación por la capacidad técnica de los modelos desplace preguntas fundamentales sobre equidad, impacto territorial, sostenibilidad real y pertinencia social del conocimiento producido, entre otros.

La ingeniería del presente no puede limitarse únicamente a optimizar sistemas o mejorar indicadores; debe también evaluar críticamente los modelos de desarrollo que contribuye a consolidar. En un escenario marcado por la crisis climática, las desigualdades urbanas y la acelerada digitalización de la sociedad, resulta indis-

pensable que la producción científica mantenga un equilibrio entre rigurosidad técnica, capacidad predictiva y responsabilidad ética frente a las transformaciones que impulsa.

Este número constituye una muestra de esa tensión productiva entre innovación tecnológica y reflexión crítica, evidenciando que el futuro de la ingeniería dependerá no solo de su capacidad para modelar el

mundo, sino también de su disposición para comprenderlo y transformarlo de manera responsable. En este contexto, la producción científica adquiere un sentido que no depende únicamente de su capacidad de innovación técnica, sino también de su contribución a la construcción de sociedades más sostenibles, equitativas y conscientes de las implicaciones del desarrollo tecnológico.

Alineación temática entre publicaciones científicas en ingeniería y Scopus: una evaluación basada en Latent Dirichlet Allocation

Thematic Alignment between Scientific Publications in Engineering and Scopus: An Evaluation Based on Latent Dirichlet Allocation

JUAN DANIEL TRIANA MANJARRÉS¹ - WILMER PINEDA-RÍOS² -
ANA MARÍA GÓMEZ LAMUS³

1. Magíster en Ciencia de Datos. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. juan.triana-m@escuelaing.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2217-5065>.
2. PhD(c) en Ciencias-Estadística. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. wilmer.pineda@escuelaing.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7774-951X>.
3. Magíster en Estadística. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ana.gomez@escuelaing.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9714-6780>.

Recibido: 15/10/2025 Aceptado: 02/11/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se analiza la alineación temática entre las publicaciones científicas de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y las publicaciones indexadas en Scopus en el campo de la ingeniería. Para esto, se recopilaron 694 artículos del repositorio institucional y 1310 artículos de Scopus, correspondientes al periodo 2020-2024, mediante técnicas de *web scraping* con BeautifulSoup y automatización con Selenium. Los textos se preprocesaron mediante tokenización, eliminación de *stopwords*, lematización y traducción al inglés. Posteriormente, se entrenó un modelo de Latent Dirichlet Allocation (LDA), seleccionando cuatro temas como cantidad óptima con base en la métrica de perplexidad.

Los resultados revelan una convergencia parcial entre ambas fuentes: los temas de la universidad en áreas de tecnología y materiales presentan similitudes con los de Scopus (similitud coseno máxima del 20,14 %), mientras que se identificaron diferencias en enfoques como ingeniería de estructuras y transporte (universidad) frente a educación y procesos industriales (Scopus). Estos hallazgos ofrecen un diagnóstico cuantitativo útil para orientar las líneas de investigación institucional hacia los estándares nacionales e internacionales.

En el presente estudio se evalúan la alineación temática entre la producción científica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y la bibliografía indexada en Scopus en el campo de la ingeniería. Se conformó un corpus de 694 artículos institucionales y 1310 registros de Scopus (2020-2024), procesados mediante técnicas estándar de procesamiento de lenguaje natural. Se aplicó el modelo Latent Dirichlet Allocation (LDA) a ambos corpus y se identificaron

cuatro temas latentes en cada uno. La similitud coseno entre las distribuciones de temas reveló una convergencia parcial —más marcada en aspectos de tecnología (20,14 %)—, junto a divergencias significativas: la universidad presenta mayor actividad en ingeniería de estructuras y transporte, mientras que en Scopus predominan temas de ciencia de materiales, educación y procesos energéticos.

Estos resultados constituyen una línea base empírica para orientar la agenda investigativa institucional hacia las tendencias científicas del campo.

Palabras claves: Latent Dirichlet Allocation, modelado de temas, procesamiento de lenguaje natural, bibliometría, producción científica.

Abstract

This study examines the thematic alignment between the scientific publications of the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito and Scopus-indexed publications in the field of engineering. A total of 694 articles from the institutional repository and 1,310 articles from Scopus, spanning the 2020-2024 period, were collected using web scraping techniques with BeautifulSoup and browser automation with Selenium. Text preprocessing included tokenization, stopword removal, lemmatization, and translation into English. A Latent Dirichlet Allocation (LDA) model was then trained, with four topics selected as the optimal number based on the perplexity metric.

The results indicate partial thematic convergence: university topics related to technology and materials showed similarities with Scopus topics (maximum cosine similarity of 20.14%), while notable differen-

ces emerged in areas such as structural engineering and transportation (university) versus education and industrial processes (Scopus). These findings provide a quantitative assessment that can guide institutional research priorities toward national and international standards.

This study assesses the thematic alignment between the scientific output of the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito and Scopus-indexed literature in the field of engineering. A corpus of 694 institutional articles and 1,310 Scopus records (2020-2024) was compiled and processed using standard natural language processing techniques. Latent Dirichlet Allocation (LDA) was applied to both corpora, identifying four latent topics in each. Cosine similarity between topic distributions revealed partial convergence — most notably in technology-related themes (20.14%) alongside significant divergences: the university shows greater activity in structural engineering and transportation, while Scopus is dominated by materials science, education, and energy processes.

These results provide an empirical baseline for aligning the institutional research agenda with prevailing scientific trends in the field.

Keywords: Latent Dirichlet Allocation, topic modeling, natural language processing, bibliometrics, scientific production.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, la inversión en investigación y desarrollo ha crecido de manera sostenida en la última década (Marroquín y Ríos, 2012), lo que ha impulsado un aumento en la producción científica de las instituciones de educación superior (IES). No obstante, un mayor volumen de publicaciones no garantiza que estas se alineen con las tendencias temáticas reconocidas en la comunidad científica internacional. Evaluar dicha correspondencia es fundamental para que las universidades orienten estratégicamente sus esfuerzos investigativos (González et al., 2020).

La Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito es una institución de referencia en formación e investigación en ingeniería en Colombia. A pesar de su trayectoria, no se cuenta con un análisis sistemático que cuantifique en qué medida su producción científica se alinea con los temas predominantes en bases de datos de referencia como Scopus. Esta ausencia de evidencia empírica dificulta la identificación de fortalezas y brechas en la agenda investigativa institucional.

En el presente estudio se aborda este problema aplicando el modelo Latent Dirichlet Allocation (LDA) (Blei et al., 2003) a un corpus de publicaciones de la universidad y de Scopus, con el objetivo de determinar el grado de alineación temática entre ambas fuentes mediante la comparación de temas latentes y métricas de similitud coseno.

La alineación de las publicaciones académicas con los estándares y temas reconocidos en los ámbitos nacional e internacional es un factor clave para garantizar la relevancia y el impacto de la investigación universitaria (Aria y Cuccurullo, 2017). Evaluar la correspondencia entre las investigaciones de una institución y los criterios de repositorios de referencia como Scopus permite comprender su posicionamiento en la comunidad académica global y detectar oportunidades de fortalecimiento.

La Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito es una institución de referencia en la formación e investigación en ingeniería en Colombia. Sin embargo, no se ha hecho un análisis sistemático que determine en qué medida sus publicaciones están alineadas con las tendencias temáticas reconocidas en el campo de la ingeniería a escala nacional. Este vacío representa una oportunidad para identificar fortalezas, así como áreas en las que la producción científica se podría orientar hacia temas de mayor impacto.

Para abordar este problema, en el presente estudio se emplea el modelo Latent Dirichlet Allocation (LDA), una técnica de minería de texto que permite identificar temas latentes en colecciones de documentos (Blei et al., 2003). Mediante la comparación de los temas extraídos de las publicaciones institucionales con aquellos provenientes de Scopus, se busca ofrecer un diagnóstico cuantitativo de la convergencia temática entre ambas fuentes.

El objetivo de este artículo es determinar el grado de alineación temática entre las publicaciones científicas de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y las publicaciones indexadas en Scopus en el campo de la ingeniería, utilizando modelado de temas con LDA y métricas de similitud como herramientas de evaluación.

ESTADO DEL ARTE

Indicadores bibliométricos y sus limitaciones

Los indicadores bibliométricos —como el factor de impacto y el índice H— son herramientas ampliamente utilizadas para evaluar la calidad y visibilidad de las publicaciones científicas (González et al., 2020). Sin embargo, estos indicadores miden el impacto cuantitativo de las publicaciones sin captar su dimensión temática; es decir, permiten saber cuánto se publica y dónde, pero no sobre qué. Esta limitación ha motivado el desarrollo

de enfoques complementarios, basados en el análisis del contenido textual de las publicaciones.

Modelado de temas en el análisis de bibliografía científica

El modelado de temas permite identificar patrones temáticos subyacentes en grandes colecciones de texto (DiMaggio et al., 2013). Entre las técnicas disponibles, Latent Dirichlet Allocation (LDA) se ha consolidado como un referente para este propósito (Blei et al., 2003). LDA es un modelo probabilístico generativo que asume que cada documento es una mezcla de temas, y cada tema, una distribución sobre palabras. Se ha aplicado con éxito en la exploración de bibliografía científica (Jelodar et al., 2017; Asmussen y Møller, 2019), en revisiones sistemáticas (Grisales y Figueroa, 2022) y en el análisis de producción académica por disciplinas (Kozłowski et al., 2021).

Existen alternativas como Latent Semantic Analysis (Deerwester et al., 1990), Non-negative Matrix Factorization (Hofmann, 1999) y modelos basados en *embeddings* como BERT (Ambalavanan y Devarakonda, 2020). No obstante, se seleccionó LDA para este estudio, dado que su naturaleza probabilística permite interpretar directamente las distribuciones temáticas, se ha validado ampliamente en contextos bibliométricos y su costo computacional es adecuado para corpus de tamaño moderado.

Antecedentes en evaluación temática de producción científica

En varios estudios se ha empleado modelado de temas para diagnosticar la producción científica institucional o regional. Kozłowski et al. (2021) aplicaron LDA al análisis de patrones en comercio internacional, demostrando la capacidad del modelo para identificar estructuras temáticas en corpus especializados. Grisales y Figueroa (2022) utilizaron LDA para mapear el rol del aprendizaje automático en revisiones sistemáticas, identificando temas claves y autores relevantes. En el contexto colombiano, Rubiano (2022) aplicó el modelo al análisis de contenido en redes sociales, validando su utilidad para corpus en español.

Sin embargo, no se identificaron estudios previos que comparan sistemáticamente la producción científica de una universidad colombiana con las tendencias

temáticas de bases indexadas como Scopus, empleando modelado de temas.

MARCO TEÓRICO: FUNDAMENTOS DEL MODELO LDA

El modelo LDA se fundamenta en la distribución de Dirichlet, una distribución de probabilidad multivariada sobre vectores de probabilidades $(\theta_1, \dots, \theta_m)$ con $\theta_i \geq 0$ y $\sum \theta_i = 1$, parametrizada por un vector de concentración $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ con $\alpha_i > 0$ (Blei et al., 2003).

En el marco bayesiano, esta distribución actúa como prior conjugada de la distribución multinomial, lo que permite obtener distribuciones posteriores en forma analítica. En LDA, la Dirichlet se utiliza para modelar dos distribuciones claves: la proporción de temas en cada documento y la proporción de palabras en cada tema.

Proceso generativo

LDA es un modelo generativo probabilístico. Para esto, Blei, Ng y Jordan (2003) definen un corpus como una colección de texto con entidades como palabras. La idea básica es que los documentos se representan como mezclas aleatorias de temas latentes, donde cada tema se caracteriza por una distribución de palabras. LDA asume el siguiente proceso generativo para cada documento w en un corpus D :

1. Se selecciona el número de palabras N a partir de una distribución Poisson(ξ).
2. Se selecciona una distribución de temas θ a partir de una distribución Dir(α).
3. Para cada una de las N palabras:
 - a) Se elige un tema z_n de la distribución multinomial (θ).
 - b) Se elige una palabra w_n de la distribución $p(w_n | z_n, \beta)$, condicionada al tema seleccionado.

De esta manera, cada documento se representa como una mezcla de temas latentes, y cada tema como una distribución sobre el vocabulario del corpus.

Inferencia

El cálculo exacto de la distribución posterior en LDA es difícil debido al acoplamiento entre los parámetros

θ y β (Blei et al., 2003). Para resolver esto, se recurre a métodos de inferencia aproximada. La inferencia variacional busca una distribución candidata más simple que aproxime la posterior, minimizando la divergencia de Kullback-Leibler. El muestreo de Gibbs es una alternativa basada en simulación. En este estudio se empleó la implementación de Gensim en Python, que utiliza inferencia variacional.

Supuestos y limitaciones del modelo

LDA opera con dos supuestos fundamentales: independencia entre documentos y una representación de bolsa de palabras que ignora el orden léxico. Esto implica que el modelo no capta relaciones semánticas complejas ni dependencias sintácticas. Adicionalmente, el número de temas se debe definir *a priori*, lo cual requiere una métrica de selección —en este caso, la perplejidad—. Estas limitaciones se consideran en la interpretación de los resultados presentados más adelante, en la sección “Resultados y discusión”.

METODOLOGÍA

El proceso metodológico se organizó en cuatro etapas: 1) recopilación de datos; 2) preprocesamiento de texto; 3) selección del número de temas, y 4) entrenamiento del modelo LDA.

Recopilación de datos

Se recopilieron artículos de dos fuentes para el periodo 2020-2024:

- **Repositorio institucional.** Se extrajeron 694 artículos (tesis de grado y trabajos dirigidos) del repositorio virtual de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería (<https://repositorio.escuelaing.edu.co>), mediante *web scraping* con la librería BeautifulSoup en Python.
- **Scopus.** Se extrajeron 1310 artículos indexados en Scopus, filtrados por el área temática de ingeniería y por afiliación a instituciones colombianas. Dado que Scopus requiere autenticación, se implementó un proceso de automatización con Selenium para simular la navegación, aplicar los filtros correspondientes y exportar los registros en formato CSV.

El corpus resultante comprende los títulos y resúmenes de los artículos de ambas fuentes. Si bien este alcance no incluye el texto completo, los resúmenes constituyen representaciones condensadas del contenido temático y se han empleado en estudios similares de modelado de temas (Asmussen y Møller, 2019).

Preprocesamiento de texto

El preprocesamiento incluyó las siguientes etapas secuenciales:

- **Tokenización.** Segmentación del texto en unidades léxicas individuales.
- **Eliminación de stopwords.** Remoción de palabras funcionales, incluyendo listas genéricas del idioma y términos específicos del dominio añadidos tras inspección manual del corpus (por ejemplo, “university”, “study”, “paper”).
- **Lematización.** Reducción de las palabras a su forma base para consolidar variantes morfológicas.
- **Traducción.** Los textos en español se tradujeron al inglés mediante la herramienta Google Translate API, para unificar el idioma del corpus y permitir la comparabilidad entre fuentes. Se reconoce que la traducción automática puede introducir sesgos léxicos que inciden en la representación de los temas.

Selección del número de temas

El número óptimo de temas se determinó mediante la métrica de perplejidad, que evalúa la capacidad predictiva del modelo sobre datos no observados: valores menores indican un mejor ajuste. Se entrenaron modelos LDA con un rango de dos a seis temas y se seleccionó el valor que minimizó la perplejidad (figura 1). En ambos corpus, el número óptimo resultó ser cuatro temas. Cabe señalar que se utilizó únicamente la perplejidad como criterio de selección; métricas complementarias como la coherencia de temas (Cv o CNPMI) podrían ofrecer una validación adicional y se consideran como trabajo futuro.

La perplejidad se define así:

$$\text{perplejidad} (D_{\text{test}}) = \exp \left\{ -\frac{\sum_{d=1}^M \log p(w_d)}{\sum_{d=1}^M N_d} \right\}$$

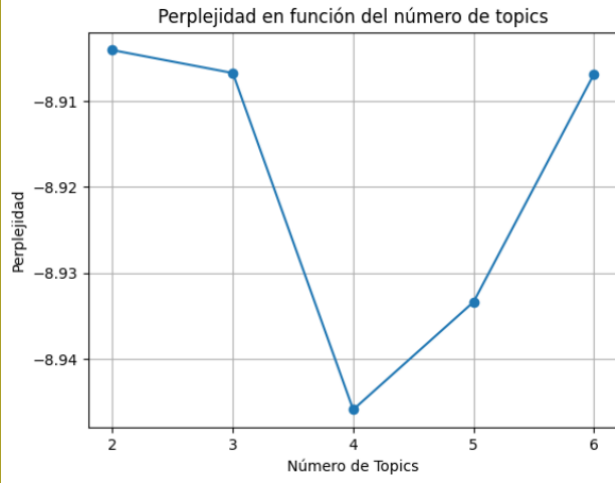


Figura 1. Perplejidad aplicada al corpus de la universidad
Fuente: Elaboración propia.

Entrenamiento del modelo y métricas de comparación

Se entrenaron dos modelos LDA independientes —uno para cada corpus—, utilizando la librería Gensim en Python. Para evaluar la alineación temática, se calculó la similitud coseno entre los vectores de distribución de palabras de los temas de cada modelo. La similitud coseno mide el coseno del ángulo entre dos vectores, tomando valores entre 0 (ninguna similitud) y 1 (similitud total). Esta métrica permite cuantificar el grado de correspondencia temática entre los temas de la universidad y los de Scopus.

La similitud del coseno se define como:

$$\text{similarity} = \cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción del corpus

En las tablas siguientes se presenta la distribución temporal de los artículos recopilados (tablas 1 y 2).

Tabla 1

Artículos del repositorio de la universidad por año

Año	2020	2021	2022	2023	2024
Artículos	103	227	162	175	27

Tabla 2

Artículos de Scopus por año

Año	2020	2021	2022	2023	2024
Artículos	327	323	277	270	99

Se observa una producción relativamente estable en ambas fuentes entre 2020 y 2023. La disminución en 2024 corresponde a un año con datos parciales al momento de la extracción, por lo que no refleja una tendencia decreciente. Cabe señalar que el corpus de Scopus es aproximadamente el doble del institucional, lo cual se explica por la mayor amplitud de la base indexada al incluir publicaciones de múltiples instituciones colombianas en el área de ingeniería.

Selección del número de temas

Se evaluaron modelos LDA con un rango de dos a seis temas. La Figura 2 muestra la curva de perplejidad para el corpus de la universidad, cuyo valor mínimo se alcanzó en cuatro temas. Este mismo resultado se obtuvo para el corpus de Scopus, por lo que se adoptó $k = 4$ como parámetro para ambos modelos. El rango evaluado fue acotado (2 a 6), debido al tamaño moderado de los corpus; con conjuntos de datos más amplios, un rango mayor podría revelar estructuras temáticas adicionales.

Temas identificados

El modelo LDA permitió identificar cuatro temas en cada corpus, etiquetados a partir de las palabras con mayor peso en cada distribución (figura 3):



Figura 3
Temas
identificados y
etiquetados en
cada corpus

Temas de la universidad

– Tema 0: Terapia y atención médica

Este tema refleja una línea de investigación orientada hacia la salud desde la ingeniería, abarcando áreas como la ingeniería biomédica, el diseño de dispositivos terapéuticos y la optimización de procesos de atención clínica. Su presencia en una institución de ingeniería sugiere un enfoque interdisciplinario que busca aplicar métodos cuantitativos y tecnológicos a la solución de problemas en el sector de la salud, como la rehabilitación, la instrumentación médica y el análisis de datos clínicos.

– Tema 1: Ingeniería de estructuras

Constituye un eje temático tradicional y consolidado dentro de la ingeniería civil. Este tema agrupa investigaciones relacionadas con el análisis, diseño y comportamiento de estructuras, incluyendo materiales de construcción, resistencia sísmica y modelado estructural. Su prominencia es coherente con la trayectoria de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería, cuya formación en ingeniería civil ha sido uno de sus pilares académicos.

– Tema 2: Tecnología y servicios

Este tema abarca investigaciones vinculadas al desarrollo tecnológico y su aplicación en la prestación de servicios, incluyendo sistemas de información, transformación digital, automatización de procesos y soluciones basadas en *software*. Representa el tema con mayor convergencia frente a Scopus (similitud

coseno del 20,14 %), lo que indica que la universidad está produciendo conocimiento alineado con las tendencias globales en esta área.

– Tema 3: Transporte e infraestructura

Agrupa publicaciones enfocadas en la planificación, diseño y gestión de sistemas de transporte e infraestructura vial. Este tema responde a necesidades específicas del contexto colombiano, donde los desafíos en movilidad urbana, logística y desarrollo de infraestructura son prioritarios. Su presencia diferenciada respecto a Scopus evidencia una producción científica orientada a problemas locales y regionales.

Temas de Scopus

– Tema 0: Materiales y propiedades

Este tema concentra la investigación internacional en ciencia e ingeniería de materiales, incluyendo el estudio de propiedades mecánicas, térmicas y químicas de materiales avanzados, como compuestos, nanomateriales y aleaciones. Refleja una tendencia global hacia la innovación en materiales como motor de avances en múltiples ramas de la ingeniería, desde la manufactura hasta la biomedicina.

– Tema 1: Educación y aprendizaje

Representa una línea temática centrada en la investigación sobre pedagogía en ingeniería, metodologías de enseñanza-aprendizaje, uso de tecnologías educa-

tivas y evaluación de competencias. Su presencia en Scopus evidencia un creciente interés de la comunidad científica internacional por mejorar la formación de ingenieros, un área en la que la universidad podría fortalecer su producción investigativa.

– Tema 2: Tecnología y aplicaciones

Agrupar publicaciones sobre el desarrollo y la implementación de soluciones tecnológicas en diversos dominios, incluyendo inteligencia artificial, internet de las cosas (IoT), computación en la nube y sistemas inteligentes. Este tema es el que presenta mayor similitud con el tema 2 de la universidad (“Tecnología y servicios”), confirmando que existe un espacio de convergencia temática entre la producción institucional y las tendencias internacionales.

– Tema 3: Energía y procesos

Este tema refleja la relevancia global de la investigación en sistemas energéticos, eficiencia de procesos industriales, energías renovables y sostenibilidad. Su presencia dominante en Scopus y su baja correspondencia con los temas de la universidad representa una oportunidad para que la institución explore y desarrolle líneas de investigación en transición energética y procesos sostenibles.

Los temas de la universidad reflejan un perfil investigativo con énfasis en ingeniería civil e infraestructura, complementado por un componente interdisciplinario en salud (tema 0) que probablemente corresponde a trabajos de grado con aplicaciones en bioingeniería o gestión hospitalaria. Los temas de Scopus, en cambio, muestran un perfil orientado hacia ciencia de materiales, procesos energéticos y educación en ingeniería, áreas que concentran una proporción significativa de la producción científica indexada en el ámbito nacional.

Análisis de similitud

A renglón seguido se presenta la matriz de similitud coseno entre los temas de ambos modelos. Los valores oscilan entre 0 (sin similitud) y 1 (similitud total), expresados en porcentaje (tabla 3).

Tabla 3

Similitud coseno entre temas LDA de la universidad y Scopus

	Scopus T0	Scopus T1	Scopus T2	Scopus 3
Univ. T0	19,23 %	14,92 %	18,15 %	18,74 %
Univ.T1	11,65 %	12,27 %	15,80 %	13,25 %
Univ. T2	15,77 %	13,89 %	20,14 %	15,73 %
Univ. T3	15,81 %	15,96 %	17,55 %	17,09 %

La mayor similitud se observa entre el tema 2 de la universidad (“Tecnología y servicios”) y el tema 2 de Scopus (“Tecnología y aplicaciones”), con un 20,14 %. Esto indica que el área de tecnología es aquella en la que la producción institucional tiene mayor correspondencia con las tendencias nacionales indexadas. Le sigue la correspondencia entre los temas 0 (19,23 %), que si bien comparten vocabulario, representan temas distintos (salud vs. materiales), lo que sugiere una coincidencia léxica más que temática.

En contraste, el tema 1 de la universidad (“Ingeniería de estructuras”) presenta los valores más bajos de similitud con todos los temas de Scopus (11,65 % – 15,80 %), lo que indica que esta línea de investigación institucional tiene menor representación en la bibliografía indexada nacional. Esto no implica necesariamente una debilidad, sino que puede reflejar un nicho de especialización institucional con menor presencia en Scopus.

Implicaciones para la agenda investigativa

Estos resultados permiten identificar tres escenarios para la planificación investigativa de la universidad:

- Áreas de fortaleza alineada.** Tecnología y aplicaciones, donde la universidad ya muestra convergencia con Scopus y podría potenciar su visibilidad internacional.
- Áreas de oportunidad.** Ciencia de materiales, procesos energéticos y educación en ingeniería, donde Scopus muestra actividad significativa pero la producción institucional es limitada.
- Áreas de especialización local.** Ingeniería de estructuras y transporte, donde la universidad tiene un perfil propio que responde a prioridades del contexto colombiano, aunque con menor presencia en la bibliografía indexada.

CONCLUSIONES

En este estudio se aplicó el modelo LDA para evaluar cuantitativamente la alineación temática entre la producción científica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y las publicaciones indexadas en Scopus en el campo de la ingeniería. Se identificaron cuatro temas latentes en cada corpus, con una convergencia parcial más marcada en el área de tecnología (similitud coseno del 20,14 %) y divergencias en áreas como ingeniería de estructuras y transporte.

Los hallazgos permiten concluir que la universidad presenta un perfil investigativo con fortalezas en tecnología y un componente interdisciplinario en bioingeniería y gestión hospitalaria, mientras que áreas como ciencia de materiales, energía y educación en ingeniería representan oportunidades de crecimiento en línea con las tendencias de la producción científica nacional. Estos resultados constituyen una línea base empírica que puede servir como insumo para la planificación estratégica de las líneas de investigación institucional.

En el estudio se presentan limitaciones que se deben considerar: a) el corpus se limitó a títulos y resúmenes, lo que podría no captar la totalidad del contenido temático; b) la traducción automática mediante Google Translate API puede introducir sesgos léxicos; c) el modelo LDA opera con supuestos de bolsa de palabras e independencia entre documentos, y d) se utilizó únicamente la perplejidad como criterio de selección del número de temas.

Como líneas de trabajo futuro, se recomienda explorar modelos complementarios como BERT o NMF que capten relaciones semánticas más complejas, ampliar las fuentes de comparación, incluyendo bases como Web of Science, incorporar análisis temporales de la evolución de temas y extender el corpus al texto completo de las publicaciones.

REFERENCIAS

Ambalavanan, A. K., y Devarakonda, M. V. (2020). Using the contextual language model BERT for multi-criteria classification of scientific articles. *Journal of Biomedical Informatics*, 112, 103578. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2020.103578>

Aria, M., y Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>

Assmussen, C. B., y Møller, C. (2019). Smart literature review: a practical topic modelling approach to exploratory literature review. *Journal of Big Data*, 6(1), 1-18. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0255-7>

Blei, D. M., Ng, A. Y., y Jordan, M. I. (2003). Latent Dirichlet Allocation. *Journal of Machine Learning Research*, 3, 993-1022.

Deerwester, S., Dumais, S. T., Furnas, G. W., Landauer, T. K., y Harshman, R. (1990). Indexing by latent semantic analysis. *Journal of the American Society for Information Science*, 41(6), 391-407. [https://doi.org/10.1002\(SICI\)1097-4571\(199009\)41:6<391::AID-AS1>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002(SICI)1097-4571(199009)41:6<391::AID-AS1>3.0.CO;2-9)

DiMaggio, P., Nag, M., y Blei, D. (2013). Exploiting affinities between topic modeling and the sociological perspective on culture: application to newspaper coverage of U.S. government arts funding. *Poetics*, 41(6), 570-606. <https://doi.org/10.1016/j.poetic.2013.08.004>

Egger, R., Kroner, M., y Stöckl, A. (2022). Web scraping. En R. Egger (ed.), *Applied data science in tourism* (pp. 67-82). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88389-8_5

González, J. L., Castro, A. R., Mesa, M. L., y Maya, C. J. (2020). Producción científica en América Latina y el Caribe en el periodo 1996-2019. *Revista Cubana de Medicina Militar*, 49(4).

Grisales Aguirre, C. J., y Figueroa Vallejo, A. M. (2022). Modelado de temas aplicado al análisis del papel del aprendizaje automático en revisiones sistemáticas. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 12(2).

Hofmann, T. (1999). Probabilistic latent semantic indexing. *En Proceedings of the 22nd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval* (pp. 50-57). ACM. <https://doi.org/10.1145/312624.312649>

Jelodar, H., Wang, Y., Yuan, C., Feng, X., Jiang, X., Li, Y., y Zhao, L. (2017). Latent Dirichlet Allocation (LDA) and topic modeling: models, applications, a survey. *Multimedia Tools and Applications*, 78, 15169-15211. <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6894-4>

Kozłowski, D., Semeshenko, V., y Molinari, A. (2021). Latent Dirichlet Allocation model for world trade analysis. *PLOS ONE*, 16(2), e0245393. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245393>

Marroquín Arreola, J., y Ríos Bolívar, H. (2012). Inversión en investigación y crecimiento económico: un análisis empírico desde la perspectiva de los modelos de I+D. *Investigación Económica*, LXXI(282), 15-33.

Nigam, H., y Biswas, P. (2021). Web scraping: from tools to related legislation and implementation using Python. En J. S. Raj, A. M. Ilyasu, R. Bestak y Z. A. Baig (eds.), *Innovative Data Communication Technologies and Application* (pp. 149-164). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_14

Oyewole, A. T., Adeoye, O. B., Addy, W. A., Okoye, C. C., Ofodile, O. C., y Ugochukwu, C. E. (2024). Automating financial reporting with natural language processing: a review and case analysis. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(03), 575-589. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.3.0700>

Rubiano, M. A. (2022). *Análisis de temas utilizando Twitter: una aplicación del modelo LDA al caso colombiano* [trabajo de grado]. Universidad Santo Tomás.

Universidad Javeriana (2022). *Inversión en Investigación y Desarrollo (I+D): evidencia a través de las patentes*. Laboratorio de Economía de la Educación.

Wasserman, M. (2000). *Sobre la importancia de investigar en Colombia, un país subdesarrollado*. Diálogos Globales de la Exposición.

Diseño e implementación curricular para la enseñanza de conceptos actuariales en educación media

Curricular design and implementation for teaching actuarial concepts in secondary vocational education

LUZ MERY TORRES LANCHEROS¹ - YESID ESTEBAN CLAVIJO PENAGOS²

1. Magíster en Ciencia Actuarial.

luz.torres-l@mail.escuelaing.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9683-9328>.

2. Magíster en Ciencia Actuarial.

yesid.clavijo@escuelaing.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7837-5350>.

Recibido: 08/10/2025 Aceptado: 25/10/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

El objetivo de este trabajo es diseñar e implementar un currículo de matemáticas en la educación media vocacional que integre conceptos esenciales del cálculo actuarial, con el propósito de fortalecer las competencias de los estudiantes en probabilidad, estadística y matemática financiera en un colegio del municipio de Cota (Cundinamarca).

La metodología aplicada es de enfoque mixto, en la que se combinan técnicas cualitativas y cuantitativas. Tras el diseño e implementación del currículo y la aplicación de una prueba a una muestra de 50 estudiantes de grados décimo y undécimo, se evidencia que el currículo permitió a los estudiantes desarrollar competencias matemáticas aplicadas en contextos de riesgo e incertidumbre, comunes en las ciencias actuariales. Entre los principales aportes del trabajo se encuentra que el currículo actuó como una herramienta de innovación pedagógica, lo que despertó interés no solamente en los estudiantes, sino también entre los docentes, quienes valoraron el aporte de esta iniciativa, además de constituir, por sí mismo, un trabajo pionero en el estudio de la enseñanza de conceptos actuariales en la educación media.

Palabras claves: educación media, pensamiento actuarial, currículo, enseñanza, ciencias actuariales.

Abstract

The goal of this work is to design and implement a mathematics curriculum in secondary vocational education that integrates essential concepts of actuarial calculation, with the purpose of strengthening students' skills in probability, statistics, and financial mathematics in a school in the town of Cota, Cundinamarca.

The methodology applied is a mixed approach, combining qualitative and quantitative techniques. After the design and implementation of the curriculum and the application of a test to a sample of 50 High School students, it is evident that the curriculum allowed students to develop mathematical competencies applied in contexts of risk and uncertainty, common in actuarial sciences.

Among the main contributions of the work, it is found that the curriculum functioned as a tool of pedagogical innovation, awakening interest not only in the students, but also among the teachers, who valued the contribution of this initiative. In addition to constituting pioneering work in the study of the teaching of actuarial concepts at the high school level.

Keywords: high school, actuarial thinking, curriculum, teaching, actuarial science.

INTRODUCCIÓN

Problema de investigación

Las ciencias actuariales incluyen nociones de la probabilidad, de la estadística y de la matemática financiera, pero no se restringen a estas. La relevancia del presente trabajo surge de la ausencia de un enfoque estructurado en la enseñanza de estas nociones actuariales en las etapas previas a la educación superior, lo cual limita el desarrollo temprano de competencias esenciales en la toma de decisiones financieras y la gestión cuantitativa de riesgos, fundamentales para el ámbito actuarial.

Se plantea como problema de investigación para este trabajo que la falta de formación en conceptos básicos actuariales en los programas de matemáticas tradicionales en la educación media genera una desconexión entre los contenidos académicos y las competencias requeridas en los sectores actuarial, financiero y de otras áreas afines.

Objetivo del trabajo

El objetivo general de este trabajo es diseñar e implementar un currículo educativo en matemáticas para la educación media vocacional, que integre conceptos claves del cálculo actuarial, con el fin de fortalecer las competencias de los estudiantes en probabilidad, estadística y matemática financiera.

Estado del arte

Durante la construcción del estado del arte para este trabajo, teniendo en cuenta educación básica y media como ámbito de los estudios revisados, se han encontrado referencias internacionales (Andrew, 2009; Chaput et al., 2011; Helmerich, 2015; Jones, 2005; Martignon, 2014); en el área latinoamericana se destacan referentes como Batanero, Burrill et al. (2016) y Batanero, Chernoff et al. [3]. Sin embargo, a escala nacional son notables la escasez de trabajos previos de referencia (un ejemplo encontrado es Pineda [2021]) y la ausencia de estudios en los que, concretamente, se aborden el diseño y la implementación de un currículo similar al presentado ahora. Este vacío en la investigación subraya la importancia de diseñar un currículo innovador que responda a las necesidades formativas de los estudiantes en estas áreas del conocimiento y en este nivel de formación.

MARCO CONCEPTUAL

Estándares educativos del Ministerio de Educación Nacional

De acuerdo con el documento *Estándares básicos de competencias en lenguaje, matemáticas, ciencias y ciudadanas* (Ministerio de Educación Nacional, s.f.), en la enseñanza de las matemáticas en Colombia se manejan diversos enfoques pedagógicos con el objetivo de promover un aprendizaje significativo y desarrollar habilidades matemáticas en los estudiantes; uno de ellos es por competencias.

Este enfoque se centra en el desarrollo de competencias matemáticas en los estudiantes, es decir, en la capacidad de aplicar los conocimientos matemáticos en diferentes situaciones. Se busca que los estudiantes adquieran habilidades para resolver problemas, razonar matemáticamente y comunicar sus ideas de manera efectiva desde los pensamientos matemáticos, entre los que se incluyen:

- Aleatorio y los sistemas de datos.
 - Variacional y los sistemas algebraicos y analíticos.
- (Ministerio de Educación Nacional, s.f.; Ministerio de Educación Nacional, 2016).

Educación probabilística

Batanero, Chernoff et al. (2016) señalan la falta de investigaciones significativas en dos áreas críticas de la educación probabilística. En primer lugar, esta se enfoca en el análisis de los componentes del conocimiento que los docentes necesitan, incluyendo un entendimiento de la probabilidad y conocimientos pedagógicos específicos para la enseñanza de este tema; además, se propone explorar maneras efectivas de formar docentes, como la participación en simulaciones, debates de casos, planificación y análisis de lecciones, y el uso de tecnología en la educación probabilística. Finalmente, subraya la importancia de investigar perspectivas variadas de la probabilidad, mejorar el pensamiento probabilístico de los estudiantes, revisar los planes de estudio escolares y explorar el empleo de la tecnología en la educación probabilística como componentes claves para la formación docente exitosa en este campo.

El reciente enfoque en la enseñanza de la estadística inferencial, que se ha centrado en el enfoque frecuencial y métodos informales, podría llevar a la idea de

simplificar la enseñanza de la probabilidad por medio de simulaciones, sin profundizar en las reglas de probabilidad. Sin embargo, es importante recordar que, como Jones (2005) ha señalado, la comprensión y el razonamiento sobre probabilidades son fundamentales tanto en la vida cotidiana como en el ámbito profesional, donde las decisiones se toman a menudo en situaciones que involucran probabilidad, como inversiones en el mercado de valores, diagnósticos médicos y votaciones; por lo tanto, es necesario diseñar programas educativos que, ya desde la educación media, aborden los aspectos y componentes del conocimiento y razonamiento sobre la probabilidad para atender a una amplia gama de estudiantes.

Dado que hoy en día un número cada vez mayor de acontecimientos se describen en términos de riesgo, los conceptos y razonamientos subyacentes se deben aprender en la escuela y también se ha de investigar la comprensión del riesgo por parte de los jóvenes (Martignon, 2014).

Pensamiento aleatorio y variacional

Para la construcción de la propuesta en este trabajo, hay que centrarse en el desarrollo de competencias, principalmente en los pensamientos “Aleatorio y los sistemas de datos” y “Variacional y los sistemas algebraicos y analíticos”, teniendo en cuenta el contexto nacional (Ministerio de Educación Nacional, s.f.).

El primer pensamiento se centra en la toma de decisiones en situaciones de incertidumbre, azar, riesgo o ambigüedad. Este tipo de pensamiento utiliza conceptos y procedimientos de la teoría de probabilidades y estadística, explorando fenómenos físicos, sociales o juegos de azar mediante la construcción de modelos y estrategias como la simulación de experimentos y conteos. Se relaciona con la falta de patrones en eventos o sucesos, como el clima, desastres naturales, accidentes y elecciones. El segundo pensamiento, por su parte, implica la capacidad de reconocer, percibir, identificar y caracterizar la variación y el cambio en diversos contextos, así como describir, modelar y representar estos conceptos en diferentes sistemas simbólicos, como los verbales, icónicos, gráficos o algebraicos.

Así, el abordaje de situaciones que implican fenómenos estocásticos requiere el uso de conceptos asociados al pensamiento variacional y al pensamiento aleatorio.

Esto implica identificar variables, entender su comportamiento por medio de diferentes valores, distinguir entre variables independientes y dependientes, así como prever la distribución de las variables independientes para anticipar cómo se comportarán los dependientes en varios rangos de valores.

Educación financiera

Por último, como parte de las ciencias actuariales, la comprensión y manejo del dinero en el tiempo (teoría del interés), además de ser un componente básico en la formación profesional del futuro actuario (Society of Actuaries, s.f.), constituye una herramienta fundamental para el bienestar futuro de las personas. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) define la competencia financiera no como saber matemáticas, sino como un conjunto de procesos cognitivos: identificar información financiera, analizarla en contexto, evaluar problemas y aplicar el conocimiento. Explica por qué la educación financiera debe ser transversal y no solo una unidad dentro de la clase de matemáticas (OECD, 2020).

Autores como Lusardi y Mitchell (2014) han demostrado una correlación directa entre la falta de conocimientos financieros básicos y la pobreza en la vejez: el “analfabetismo financiero” es un fenómeno global que se debe combatir desde la raíz (la escuela), antes de que se formen malos hábitos financieros. A su vez, Willis (2011), si bien ha sido crítica de las formas tradicionales aplicadas en educación financiera, ha señalado la necesidad de que esta se integre al currículo, en contraposición a que se tome como un tema aislado.

Conexión con el currículo propuesto

De todo lo expuesto anteriormente, se concluye que hay que diseñar un currículo escolar que incluya conceptos básicos de actuaría desde el bachillerato, con un enfoque que articule competencias matemáticas, estadísticas y financieras, alineadas con los principios fundamentales de la ciencia actuarial, para fortalecer la formación integral de los estudiantes. Esta integración no solo les proporcionará herramientas analíticas y cuantitativas, sino que también fomentará su interés en las ciencias actuariales al mostrarles su práctica en la gestión eficaz de riesgos y recursos; además, les permitirá desarrollar

habilidades de pensamiento analítico, resolución de problemas y toma de decisiones. De este modo, se estimula la motivación intrínseca hacia esta disciplina, contribuyendo así a una formación más completa y a una mejor adaptación a un entorno socioeconómico en constante evolución y a la construcción de una sociedad más justa, equitativa y desarrollada.

METODOLOGÍA

Tipo de estudio y enfoque

El tipo de estudio para el desarrollo del currículo es investigación-acción, en el cual, como señala Stenhouse (1997), el currículo se concibe como un análisis de la práctica, como un marco en el que hay que resolver problemas concretos planteados en situaciones diversas, mientras que el enfoque metodológico adoptado en este trabajo es de tipo mixto, el cual combina enfoques cualitativos y cuantitativos. Por un lado, se identifican y seleccionan los conceptos fundamentales de la matemática actuarial adecuados para su enseñanza en el nivel de educación media vocacional, y por otro lado, se desarrollan materiales didácticos que fomenten una comprensión práctica de estos conceptos, al igual que una estructura curricular progresiva, adaptada a las etapas de desarrollo cognitivo de los estudiantes.

Cada uno de los estándares presentados en el currículo se acompaña de un desglose de competencias, lo que evidencia la aplicación del concepto actuarial en la enseñanza de temas como probabilidad, estadística, matemática financiera y teoría del riesgo. De este modo, se busca que los estudiantes, después de haber trabajado con ellos los conceptos y los ejercicios con un diseño adecuado (un ejemplo, en la figura 1), desarrollen habilidades esenciales, ya que esto les permitirá interpretar y modelizar escenarios de incertidumbre y adquirir herramientas fundamentales para futuros desempeños académicos y profesionales en áreas relacionadas con la actuaría y otras ciencias.

A continuación, se muestra uno de los estándares definidos. Por su extensión, no es posible presentar el currículo en su totalidad en este artículo (tabla 1).

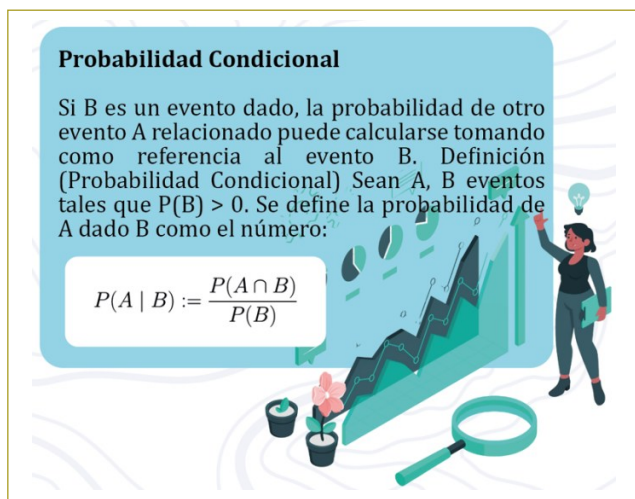


Figura 1. Uno de los conceptos importantes y cómo se presentó.

Fuente: Elaboración propia.

Contexto de implementación

El currículo se implementó a estudiantes de los grados décimo y undécimo del Colegio Bilingüe Maximiliano Kolbe, en el año 2024, y la implementación curricular tuvo lugar en un intervalo de tiempo de seis meses.

Instrumento de evaluación

Para evaluar el impacto del currículo propuesto, se utilizará un enfoque experimental con los estudiantes, quienes recibirán la intervención curricular. Se hará una prueba después de la implementación del currículo, con el fin de medir los efectos en el aprendizaje, y de manera igualmente importante por la novedad de los conceptos y la no necesidad de profundizarlos por ahora, el interés de los estudiantes.

A continuación, se presenta un resumen del análisis de resultados obtenidos tras la aplicación de la prueba descrita, la cual permitió medir cuantitativamente el grado de dominio de los estudiantes sobre los contenidos, identificando áreas de fortaleza y aspectos que requieren refuerzo. Esta prueba consta de 20 preguntas, seleccionadas de acuerdo con los estándares definidos en el currículo, cada uno de los cuales, a su vez, consta de un tema principal, un tipo de pensamiento, de competencia, de competencia SOA (Society of Actuaries) y de propósitos y valores definidos por la Asociación Colombiana de Actuarios (ACA).

Tabla 1
Uno de los estándares del currículo propuesto

Estándar 1	Seleccionar técnicas adecuadas para estimar la probabilidad de eventos aleatorios
DBA	Selecciona muestras aleatorias en poblaciones y explica inferencias basadas en los resultados.
Contenido o tema	Estimación de probabilidades de eventos aleatorios.
Pensamiento matemático	Pensamiento aleatorio.
Tipo de competencia que se va a desarrollar (MEN)	Razonamiento. Resolución de problemas.
Competencia SOA	Seleccionar y aplicar técnicas de estimación de probabilidad adecuadas para modelar la ocurrencia de eventos aleatorios en el ámbito actuarial, estimar probabilidades de eventos futuros, evaluar la precisión de los modelos y utilizar los resultados para tomar decisiones estratégicas.
Propósitos y valores ACA	Organizar y fomentar actividades relacionadas con la profesión actuarial, así como equipar a los futuros profesionales con herramientas necesarias para enfrentar exitosamente desafíos técnicos y económicos. Valores • Excelencia profesional. Formar estudiantes con una comprensión básica de la teoría de probabilidades, permitiéndoles abordar problemas en diversos contextos. • Responsabilidad Social. Utilizar comparaciones probabilísticas para diseñar soluciones que minimicen riesgos y beneficien a la sociedad. • Colaboración y Comunidad. Fomentar el trabajo en equipo en la resolución de problemas probabilísticos, promoviendo la discusión y el intercambio de enfoques. • Innovación. Incentivar la exploración de enfoques novedosos en la comparación de probabilidades, aplicando nuevas técnicas actuariales y herramientas tecnológicas. • Empoderamiento. Preparar a los estudiantes para tomar decisiones fundamentadas en datos y probabilidades, empoderándolos como agentes de cambio en el contexto actuarial. • Aprendizaje Continuo. Establecer una base en probabilidades, motivando a los estudiantes a profundizar en conceptos más avanzados durante su desarrollo profesional.

Fuente: Elaboración propia.

Las preguntas se pueden agrupar en cuatro bloques, que abarcan todos los campos teóricos de base para este trabajo:

1. Comprensión del concepto de ciencia actuarial.
2. Probabilidad.
3. Estadística inferencial.
4. Matemática financiera básica.

Así mismo, se ha explorado en un par de preguntas (5) el uso de las TIC en contextos actuariales. Por razones de espacio, se presenta solo un ejemplo de análisis de los resultados obtenidos tras la aplicación de la prueba, por cada uno de los bloques (1) - (5) descritos.

Lo anterior se complementó con un análisis cualitativo, el cual incluye observaciones sobre el desempeño y las dificultades manifestadas durante la implementación del currículo.

RESULTADOS

A renglón seguido, se presenta el porcentaje general de estudiantes que respondieron correctamente a la evaluación (de 20 preguntas) implementada.

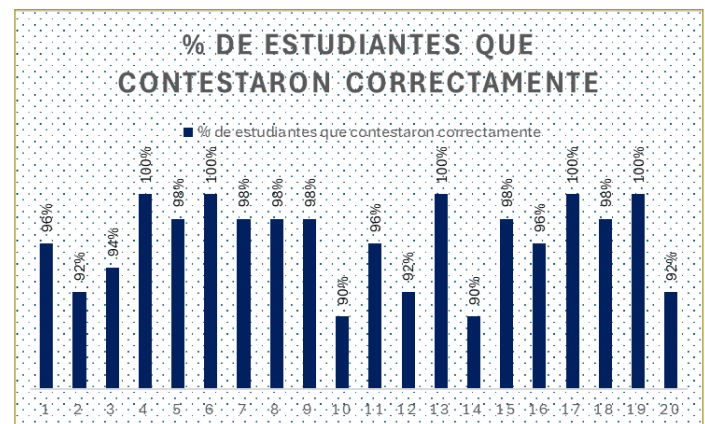


Figura 2. Porcentaje de respuestas correctas por pregunta.

Fuente: Elaboración propia.

(1) Comprensión de “ciencia actuarial”

- Preguntas involucradas
Pregunta 1: ¿Cuál de las siguientes opciones describe mejor qué es la ciencia actuarial?
Pregunta 20: ¿En cuál de las siguientes listas todas las palabras corresponden a alguna ciencia actuarial?
- Concepto evaluado
Estas preguntas están orientadas a evaluar el entendimiento básico de definición de las ciencias actuariales (o “ciencia actuarial”), su propósito y las disciplinas que la componen; en particular, el objetivo es verificar que los estudiantes comprendan que aquellas se centran en el análisis de riesgos e incertidumbre para diseñar soluciones financieras y de seguros. También se busca identificar si los estudiantes pueden distinguirlas de otras disciplinas, relacionadas, pero con enfoques aplicados diferentes.
- Análisis de resultados
La mayoría de los estudiantes (96 % en Pregunta 1 y 92 % en Pregunta 20) respondieron correctamente, demostrando una buena comprensión de la definición. Sin embargo, algunos estudiantes mostraron confusión al seleccionar opciones que describían otras disciplinas, como el estudio del comportamiento humano o geología, lo cual sugiere que sería beneficioso incorporar actividades de reflexión y discusión sobre el propósito y las funciones únicas de las ciencias actuariales en comparación con otras profesiones. Esto ayudaría a cimentar la identidad profesional y a aclarar las diferencias entre ciencias actuariales y otras ciencias aplicadas.

(2) Probabilidad: Distribuciones

- Preguntas involucradas
Pregunta 5: Distribución adecuada para modelar promedios.
Pregunta 7: Distribución para modelar el número de siniestros.
Pregunta 9: Distribución para modelar el tiempo entre siniestros.
- Concepto evaluado
El tema de distribuciones de probabilidad permite a los estudiantes identificar modelos adecuados

para diversos tipos de datos: la distribución normal para promedios, la distribución de Poisson para contar eventos como el número de siniestros por unidad de tiempo y la distribución exponencial para modelar el tiempo entre eventos. Estas herramientas son fundamentales para evaluar y gestionar riesgos en seguros y finanzas, lo que facilita la toma de decisiones basada en la probabilidad y la estadística.

- Análisis de resultados
Hubo un 98 % de aciertos en las preguntas sobre distribución normal y distribución de Poisson. Un estudiante confundió la modelación de tiempos con la distribución normal en lugar de la distribución exponencial.
La mayoría de los estudiantes comprenden el uso de distribuciones de probabilidad en contextos actuariales, pero hay una pequeña confusión en la aplicación de distribuciones en función del tipo de datos y su naturaleza (discreta o continua).

Recomendación: Se sugiere incluir una sección con ejemplos ilustrativos en la que se explique el uso de diferentes distribuciones en función de la naturaleza de los datos. Además, se podrían diseñar simulaciones que permitan a los estudiantes observar cómo se comportan las distribuciones en situaciones actuariales reales.

Estadística inferencial: Intervalos y niveles de confianza

- Preguntas involucradas
Pregunta 13: Interpretación del intervalo de confianza.
Pregunta 14: Interpretación del nivel de confianza del 99 %.
- Concepto evaluado
En el contexto actuarial, un intervalo de confianza indica el rango en el que, con cierto nivel de certeza, se espera que se encuentre un valor poblacional como, por ejemplo, el costo de siniestros. El nivel de confianza (por ejemplo, 99 %) representa la probabilidad de que el intervalo contenga el verdadero valor poblacional, brindando así precisión en la toma de decisiones basada en datos.

- **Análisis de resultados**

Todos los estudiantes respondieron correctamente la pregunta sobre interpretación de intervalos de confianza, pero hubo algunos errores en la interpretación del nivel de confianza; por lo tanto, los resultados reflejan una comprensión adecuada de los intervalos de confianza.

Recomendación: Se podrían incluir ejemplos adicionales que ayuden a detallar la diferencia entre intervalo de confianza y nivel de confianza. Además, actividades prácticas que requieran calcular ambos conceptos en diferentes escenarios podrían consolidar este conocimiento.

Matemáticas financieras: Interés, anualidades, amortización

- Preguntas involucradas

Pregunta 15: Diferencia entre intereses simples y compuestos

Pregunta 16: Característica de una anualidad ordinaria

Pregunta 17: Finalidad de un plan de amortización

- Concepto evaluado

En este grupo, las preguntas evalúan el conocimiento de conceptos de matemáticas financieras, esenciales para los actuarios que trabajan en la planificación financiera y la gestión de productos de inversión. Estos conceptos incluyen el interés simple y compuesto, las características de las anualidades y los planes de amortización.

- Análisis de resultados

Los estudiantes demostraron una comprensión muy alta en este tema, con un 96 %-100 % de respuestas correctas en todas las preguntas. Esto indica que han captado los conceptos básicos de matemáticas financieras, aunque algunos errores menores sugieren que podría ser útil proporcionar ejercicios comparativos más profundos sobre los tipos de interés (simple vs. compuesto) y las características de productos financieros.

Recomendación: Se sugiere reforzar estos temas con la realización de más ejercicios y casos prácticos.

Extra¹: Herramientas y TIC en el contexto actuarial

- Preguntas involucradas

Pregunta 18: Ventaja del uso de TIC en cálculos actuariales.

Pregunta 19: Herramienta para calcular amortizaciones y generar tablas de pago.

- Concepto evaluado

Este tema evalúa el conocimiento sobre el uso de TIC y herramientas digitales específicas, como Excel, para agilizar cálculos y mejorar la precisión en la gestión de riesgos financieros. El uso adecuado de TIC es clave en el ámbito actuarial moderno, ya que permite procesar grandes cantidades de datos y hacer análisis complejos de manera eficiente.

- Análisis de resultados

El alto nivel de acierto indica que los estudiantes comprenden la importancia de las TIC en el contexto actuarial. Esto demuestra que están familiarizados con las herramientas digitales básicas para hacer cálculos actuariales.

Recomendación: Se podrían ofrecer actividades que introduzcan el uso de *software* actuarial especializado, además de Excel, lo cual permitiría a los estudiantes experimentar con aplicaciones más avanzadas y específicas del campo actuarial.

ANÁLISIS CUALITATIVO DE LOS RESULTADOS

A lo largo de la implementación del currículo en ciencias actuariales, *se observaron directamente* diversas reacciones en los estudiantes, las cuales reflejan no solo el impacto del contenido en su proceso de aprendizaje, sino también su motivación y actitud frente a una disciplina que, para muchos de ellos, es novedosa y compleja. Estos elementos cualitativos brindan información valiosa acerca de cómo perciben y enfrentan los desafíos que plantea el currículo, así como sobre

1. Se presenta así, dado que no forma parte del objetivo central del presente trabajo, el cual es diseñar e implementar un currículo educativo en matemáticas para la educación media vocacional, integrando conceptos claves del cálculo actuarial.

su disposición para asimilar y aplicar conocimientos en el contexto actuarial.

Durante varias sesiones, se pudo observar que algunos estudiantes experimentaron expresiones de *dificultad* al abordar conceptos estadísticos y actuariales avanzados, como el teorema de Bayes y el uso de distribuciones de probabilidad. Esta clase de temas, aunque esenciales en la formación actuarial, resultó desafiante para los estudiantes, lo cual generó momentos de duda y, en algunos casos, frustración; no obstante, estos momentos de dificultad estuvieron acompañados por esfuerzos significativos de los estudiantes para superar las barreras conceptuales. La participación en preguntas, la revisión de ejemplos y la realización de ejercicios prácticos muestran que, a pesar de los desafíos, los estudiantes asumieron una postura de *compromiso* hacia su aprendizaje.

Otro aspecto positivo observado a lo largo de la implementación fue la *motivación e interés* creciente de los estudiantes por los conceptos actuariales. A medida que avanzaban en los contenidos y descubrían las aplicaciones prácticas de los temas en el ámbito financiero y de seguros, los estudiantes mostraron un entusiasmo genuino por entender cómo estos conocimientos podrían ser relevantes en su vida cotidiana y futura vida profesional.

La curiosidad y el deseo de aprender algo nuevo reflejan que los estudiantes han interiorizado los beneficios de este currículo y visualizan la ciencia actuarial como una posible área de desarrollo profesional.

La posibilidad de aplicar conceptos actuariales a situaciones de la vida real generó un ambiente positivo en el aula. Los estudiantes apreciaron el valor práctico de la formación actuarial, lo que se reflejó en su interés por los temas y su disposición a participar activamente en las actividades. La implementación de ejemplos prácticos y ejercicios contextualizados les permitió visualizar cómo los conceptos actuariales se pueden emplear en su entorno, lo cual consolidó su interés y los motivó a comprometerse con el currículo.

Todo el análisis cualitativo sugiere que la implementación del currículo actuarial ha sido una experiencia enriquecedora, que no solo ha ampliado los horizontes académicos de los estudiantes, sino que también los ha preparado para enfrentar desafíos futuros con una base en análisis y resolución de problemas. Las observaciones cualitativas indican que el currículo tiene el potencial de

continuar desarrollando en los estudiantes habilidades y conocimientos claves para su formación integral, con aplicaciones prácticas tanto en su entorno inmediato como en su futura vida profesional.

CONCLUSIONES

La implementación de un currículo en ciencias actuariales en los grados décimo y undécimo de educación media vocacional ha permitido evaluar de manera integral el nivel de comprensión de los estudiantes en conceptos fundamentales de probabilidad, estadística y finanzas aplicadas en el contexto actuarial.

La prueba de evaluación mostró resultados positivos en términos de dominio conceptual y capacidad de aplicación de herramientas actuariales para la toma de decisiones con incertidumbre. Esto sugiere que el currículo ha cumplido con su objetivo de introducir a los estudiantes en las bases de las ciencias actuariales, disciplina que, aunque desconocida para ellos en gran medida, ha generado un interés notable y ha despertado la motivación por explorar conceptos nuevos y su aplicación práctica en la vida cotidiana y en futuros escenarios laborales.

Limitaciones del trabajo realizado

Entre las posibles limitaciones del trabajo presentado, se encuentran las siguientes:

- Dado el nivel de formación básica secundaria, es necesario que las actividades propuestas por el docente u orientador generen un ambiente que facilite la formación de los estudiantes en el conocimiento y manejo básicos de las ciencias actuariales.
- La reproducibilidad del trabajo desarrollado se puede ver limitada en escenarios con condiciones iniciales distintas de las descritas en este, por ejemplo, en aulas con pocos estudiantes o en periodos lectivos sin suficiente tiempo disponible para la implementación de las actividades y su evaluación.

Posibles líneas de trabajo futuro

Se identificaron las siguientes áreas de trabajo futuro para mejorar el proceso de aprendizaje:

- Las ciencias actuariales descritas incluyen la probabilidad, la estadística inferencial y la matemática financiera, pero hay otras, como la normativa, por ejemplo. Se pueden desarrollar estudios similares, tomando como base otras ciencias actuariales.
- Se puede aprovechar el interés mostrado por algunos docentes en conocer más sobre ciencias actuariales y transformarlo en una oportunidad para organizar talleres de actualización y formación en los que los docentes de diferentes áreas participen activamente, con miras a ampliar el alcance del currículo mediante enfoques interdisciplinarios y promover un ambiente colaborativo.

Con su implementación, ajustes y mejoras continuas, se espera que tanto el currículo propuesto como las actividades relacionadas sean una referencia para otros colegios interesados en innovar en sus currículos de matemáticas, con el propósito de que puedan ofrecerles a los estudiantes una experiencia educativa pertinente que los capacite para enfrentar los desafíos de un mundo laboral en constante cambio.

REFERENCIAS

- Andrew, L. (2009). Experimental probability in elementary school. En R. Johnson, *Teaching statistics* (2nd ed., vol. 31, pp. 34-36). <https://doi.org/10.1111/j.1467-9639.2009.00362.x>
- Batanero, C., Burrill, G., y Reading, C. (eds.) (2011). *Teaching statistics in school mathematics-Challenges for teaching and teacher education: A Joint ICMI/IASE Study. The 18th ICMI Study* (vol. 14). Springer. 10.1007/978-94-007-1131-0
- Batanero, C., Chernoff, E. J., Engel, J., Lee, H. S., y Sánchez, E. (2016). *Research on teaching and learning probability*. Springer International Publishing. 10.1007/978-3-319-31625-3
- Chaput, B., Girard, J.-C., y Michel, H. (2011). Frequentist approach: modelling and simulation in statistics and probability teaching. En *Teaching statistics in school mathematics-Challenges for teaching and teacher education* (pp. 85-95). Springer. 10.1007/978-94-007-1131-0_12
- Helmerich, M. A. (2015). Rolling the dice – exploring different approaches to probability with primary school students. HAL. <https://hal.science/hal-01287071>
- Jones, G. A. (ed.) (2005). *Exploring probability in school: challenges for teaching and learning* (vol. 40). Springer US. https://doi.org/10.1007/0-387-24530-8_3
- Lusardi, A., y Mitchell, O. S. (2014). The economic importance of financial literacy: theory and evidence. *Journal of Economic Literature*, 52(1), 5-44.
- Martignon, L. (2014). Fostering children's probabilistic reasoning and first elements of risk evaluation. In *Probabilistic thinking, presenting plural perspectives* (pp. 149-160). Springer. 10.1007/978-94-007-7155-0_9
- Ministerio de Educación Nacional (s.f.). *Estándares básicos de competencias en lenguaje, matemáticas, ciencias y ciudadanas*. https://www.mineducacion.gov.co/1621/articulos-340021_recurso_1.pdf
- Ministerio de Educación Nacional (2016). *Derechos básicos de aprendizaje: matemáticas*. https://wccopre.s3.amazonaws.com/Derechos_Basicos_de_Aprendizaje_Matematicas_1.pdf
- OECD (2020). *PISA 2018 Results: Are Students Smart about Money?* (vol. IV). https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2020/05/pisa-2018-results-are-students-smart-about-money_33989ca7/d540d9e9-en.pdf
- Pineda, Y. (2021). *Desarrollo del pensamiento probabilístico a través de la resolución de problemas en ámbitos de incertidumbre en estudiantes de grado tercero* [tesis de maestría]. Universidad Antonio Nariño.
- Society of Actuaries (s.f.). *A particular set of skills and fields for actuaries*. <https://www.soa.org/future-actuaries/precandidate/what/>
- Stenhouse, L. (1997). *Investigación y desarrollo del currículum*. Ediciones Morata.
- Willis, L. E. (2011). The financial education fallacy. *American Economic Review*, 101(3), 429-434.

Efecto de la interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de un arquetipo estructural con sistema combinado

Effect of the soil-structure interaction in the seismic response of a structural archetype with a combined system

JAHIR ROBERTO RODRÍGUEZ SUÁREZ¹ - SANDRA ROCÍO JEREZ BARBOSA²

1. Magíster en Ingeniería Civil. Universidad escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
jahir.rodriguez@mail.escuelaing.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7562-3398>.

2. PhD. Ingeniera Civil. Universidad escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
sandra.jerez@escuelaing.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9646-4621>.

Recibido: 10/11/2025 Aceptado: 25/11/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

La interacción suelo-estructura (ISE) puede modificar de manera significativa la respuesta sísmica de las edificaciones; sin embargo, en la práctica del diseño estructural es común asumir una condición idealizada de base fija. En el presente estudio se evalúa el efecto de la ISE en la respuesta sísmica de un arquetipo estructural con sistema combinado de pórticos y muros de concreto reforzado, diseñado con capacidad de disipación de energía moderada (DMO).

Se desarrollaron tres modelos numéricos: un modelo con base fija y dos modelos con base flexible que incorporan la ISE mediante una losa de cimentación y un sistema de pilotes, respectivamente. La evaluación estructural incluyó análisis modales espectrales y análisis estáticos no lineales, considerando variaciones en la rigidez del suelo y ajustes estructurales asociados a la demanda sísmica.

Los resultados muestran que la inclusión de la ISE incrementa los periodos de vibración y las derivas laterales, con efectos más pronunciados en la cimentación profunda. Así mismo, se evidencian redistribuciones significativas de carga axial y reducciones en la ductilidad global, en especial en el sistema de pilotes. Estos hallazgos indican que la hipótesis de base fija no siempre conduce a estimaciones conservadoras y resaltan la importancia de considerar explícitamente la ISE en el análisis y el diseño de edificaciones con sistemas estructurales combinados.

Palabras claves: interacción suelo-estructura, respuesta sísmica, análisis estático no lineal, flexibilidad de la fundación.

Abstract

Soil-structure interaction (SSI) can significantly modify the seismic response of buildings; however, in structural design practice it is common to assume an idealized fixed-base condition. This study evaluates the effect of SSI on the seismic response of a structural archetype with a combined system of reinforced concrete frames and shear walls, designed with moderate energy dissipation capacity (MED).

Three numerical models were developed: a fixed-base model and two flexible-base models that incorporate SSI through a foundation slab and a pile foundation system, respectively. The structural response was evaluated using modal response spectrum analysis and nonlinear static (pushover) analysis, considering variations in soil stiffness and structural adjustments associated with seismic demand.

The results show that the inclusion of SSI increases the fundamental vibration periods and interstory drifts, with more pronounced effects in the pile foundation system. In addition, significant redistributions of axial loads and reductions in global ductility were observed, particularly in the case of deep foundations. These findings indicate that the fixed-base assumption does not always lead to conservative estimates and highlight the importance of explicitly considering SSI in the analysis and design of buildings with combined structural systems.

Keywords: soil-structure interaction, seismic response, nonlinear static analysis, foundation flexibility.

INTRODUCCIÓN

En el análisis estructural de edificaciones convencionales es habitual asumir una condición de base fija idealizada, en la cual los apoyos impiden desplazamientos y rotaciones. Esta simplificación ha demostrado ser adecuada en numerosas aplicaciones prácticas, pero no representa explícitamente la interacción entre la superestructura, el sistema de cimentación y el suelo de fundación, en particular en edificaciones apoyadas sobre suelos deformables o cimentaciones profundas. La interacción suelo-estructura (ISE) reconoce que la deformabilidad del suelo y de la cimentación puede modificar en forma significativa la respuesta dinámica del sistema estructural, afectando parámetros como los periodos de vibración, los desplazamientos globales y la demanda de deformación inelástica.

A pesar de los avances en la comprensión de la ISE, los reglamentos de diseño sísmico continúan definiendo los coeficientes de disipación de energía y los criterios de verificación estructural a partir de modelos que asumen una base fija, incorporando los efectos de la flexibilidad del suelo de manera indirecta. Esto plantea la necesidad de evaluar si dicha hipótesis conduce a estimaciones conservadoras del comportamiento estructural o si, por el contrario, puede subestimar ciertas demandas cuando se consideran condiciones de apoyo más realistas. Adicionalmente, la bibliografía reciente evidencia vacíos relevantes, asociados a la comparación coherente entre modelos de base fija y base flexible con un mismo marco de demanda sísmica, así como a la influencia de la tipología de cimentación en la redistribución de esfuerzos y en la respuesta no lineal global.

En este contexto, el objetivo del presente estudio es evaluar el efecto de la interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de un arquetipo estructural con sistema combinado de pórticos y muros de concreto reforzado, diseñado con capacidad de disipación de energía moderada (DMO). Para esto, se desarrollan y comparan tres modelos numéricos: un modelo con base fija y dos modelos con base flexible que incorporan la ISE mediante una losa de cimentación y un sistema de pilotes. La evaluación incluye análisis modales espectrales y análisis estáticos no lineales, con el objeto de identificar los cambios inducidos por la flexibilidad del sistema suelo-cimentación en términos de periodos de vibración, derivas laterales, redistribución de cargas axiales y demanda de ductilidad.

Con este estudio, que se circunscribe a las condiciones particulares del arquetipo analizado, se busca aportar evidencia técnica sobre el alcance y la validez de la hipótesis de base fija en edificaciones con sistemas estructurales combinados, así como sobre la influencia de la tipología de cimentación en la respuesta sísmica global.

ESTADO DEL ARTE

La interacción suelo-estructura (ISE) se ha estudiado ampliamente en la ingeniería geotécnica y estructural, y se ha establecido que la flexibilidad del suelo y del sistema de cimentación puede modificar significativamente la respuesta dinámica de las edificaciones. Los trabajos clásicos de Gazetas (1991) y Wolf (1985) constituyen la base teórica para la estimación de impedancias dinámicas y para la representación analítica del sistema suelo-cimentación-estructura, demostrando que la flexibilidad de la base influye en los periodos naturales, la participación modal y la distribución de esfuerzos en la superestructura. Desde una perspectiva aplicada, Kramer (1996) y Chopra (2017) señalaron que la hipótesis de base rígida puede resultar poco representativa en suelos blandos o cimentaciones flexibles, al desconocer desplazamientos rígidos y rotaciones de la base que contribuyen de manera notable a la respuesta sísmica.

En investigaciones recientes se ha profundizado en los efectos de la ISE sobre la respuesta inelástica. Shi et al. (2026) mostraron que la ISE puede amplificar la demanda de ductilidad, dependiendo del tipo de suelo y de las características del movimiento sísmico. En edificaciones apoyadas sobre pilotes, Sharma et al. (2025) evidenciaron que la interacción suelo-pilote-estructura y la inelasticidad del sistema de cimentación pueden reducir la ductilidad global disponible de la superestructura. Por su parte, Panda et al. (2024) señalaron que la incorporación explícita de la ISE puede alterar el carácter conservador de los factores de reducción de respuesta empleados en el diseño sísmico.

A pesar de estos avances, persisten vacíos relevantes en la bibliografía existente. En particular, se observa una limitada comparación coherente entre modelos de base fija y base flexible con un mismo marco de demanda sísmica, así como una escasa consideración de la influencia de la tipología de cimentación en la redistribución de esfuerzos y en la respuesta no lineal global. Además, en

pocos estudios se abordan de manera integrada los efectos de la ISE en edificaciones con sistemas estructurales combinados, ampliamente utilizados en edificaciones de mediana altura en Colombia.

En este contexto, el presente estudio contribuye a abordar este vacío mediante la evaluación comparativa de un arquetipo estructural representativo, considerando tanto la inclusión explícita de la interacción suelo-estructura como la influencia de diferentes tipologías de cimentación, con el fin de aportar evidencia técnica sobre su impacto en la respuesta sísmica y en el desempeño estructural.

DESCRIPCIÓN DEL ARQUETIPO ESTRUCTURAL

Características de la edificación

El caso de estudio corresponde a una edificación de concreto reforzado de once niveles, concebida como un arquetipo estructural regular, con el propósito de concentrar el análisis en los efectos inducidos por la interacción suelo-estructura (ISE), minimizando la influencia de irregularidades geométricas o estructurales. El diseño de esta edificación, localizada en una zona de amenaza sísmica intermedia, se hizo considerando las condiciones de sitio definidas a partir de un estudio geotécnico representativo.

El sistema resistente principal corresponde a un **sistema estructural combinado**, conformado por pórticos resistentes a momento y muros estructurales de concreto reforzado (figura 1). Esta tipología, ampliamente empleada en edificaciones de mediana altura en Colombia, se diseñó con capacidad de disipación de energía moderada (DMO), conforme a los criterios del Reglamento NSR-10 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio [MVCT], 2010).

A continuación, se presenta la planta estructural de columnas del arquetipo analizado, en la cual se observa la distribución de columnas y muros estructurales en una retícula regular. Los elementos verticales se disponen de manera aproximadamente simétrica en ambas direcciones principales, lo que favorece un comportamiento predominantemente traslacional y reduce la vulnerabilidad a efectos torsionales. Los muros estructurales se concentran principalmente en los ejes extremos y en una zona central, aportando rigidez lateral al sistema, mientras que los pórticos contribuyen a la resistencia y ductilidad global de la estructura. En elevación, la

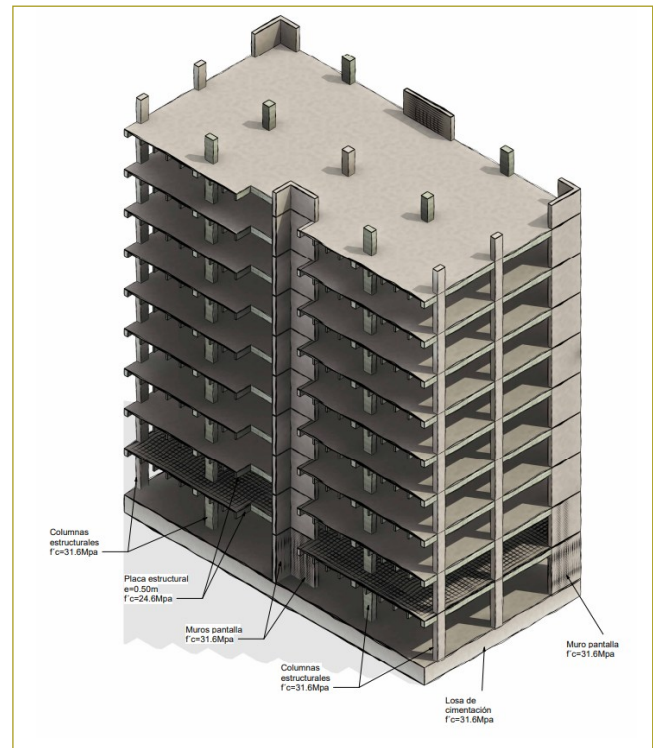


Figura 1. Modelo estructural del arquetipo analizado

Nota: Sistema estructural combinado de pórticos y muros de concreto reforzado.

Fuente: Elaboración propia.

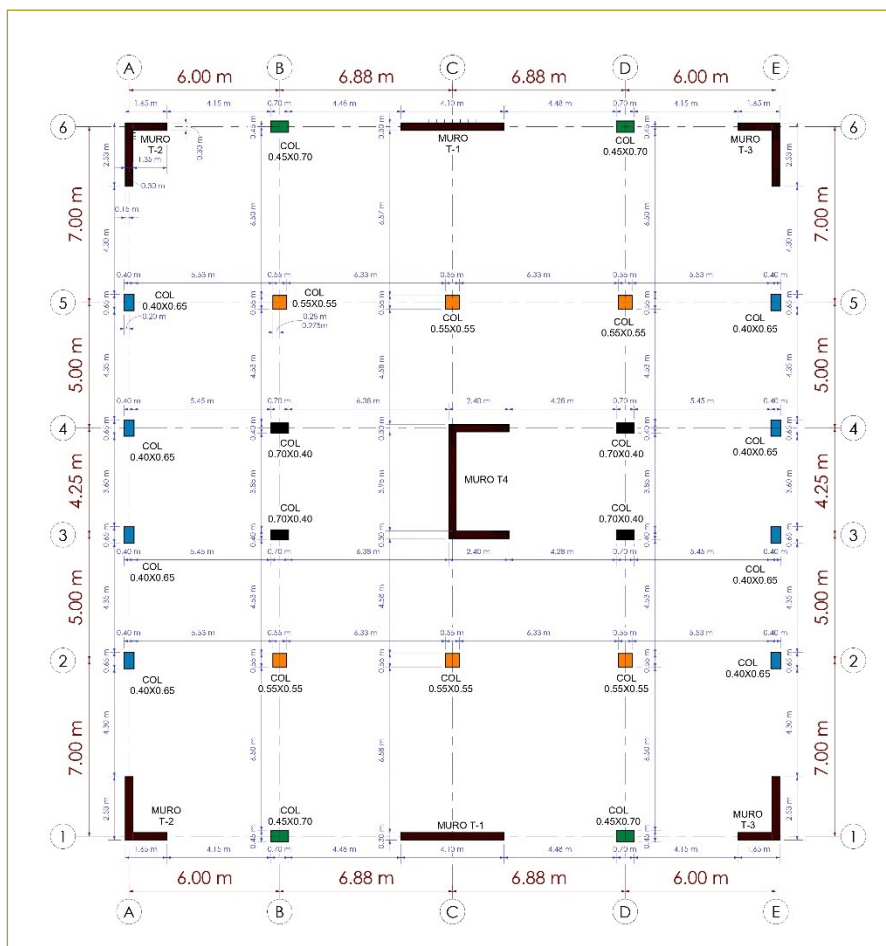
edificación mantiene continuidad en los elementos estructurales, evitando irregularidades en altura (figura 2).

El diseño estructural se hizo de acuerdo con los lineamientos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (MVCT, 2010). Los materiales empleados corresponden a concreto reforzado, con resistencias a la compresión de $f'_c = 31,6$ MPa para elementos principales (columnas, muros y cimentación) y $f'_c = 24,6$ MPa para losas.

Desde el punto de vista geotécnico, el perfil de suelo considerado corresponde a depósitos estratificados de origen aluvial, caracterizados por la presencia de arcillas y limos de alta plasticidad, intercalados con capas de arenas finas y materiales orgánicos. En particular, se identifican estratos con contenidos significativos de turbas y suelos de alta compresibilidad, lo cual incide directamente en la deformabilidad del sistema suelo-cimentación.

La caracterización dinámica del perfil, obtenida a partir de ensayos de refracción sísmica, permitió estimar valores de velocidad de onda de corte equivalentes (V_{s30}) en el rango de 180 a 360 m/s, clasificando el sitio como un perfil de suelo tipo D, de acuerdo con el

Figura 2. Planta estructural de columnas del arquetipo analizado
Fuente: Elaboración propia.



Reglamento NSR-10 (MVCT, 2010). Estas condiciones son representativas de suelos deformables, en los cuales los efectos de la interacción suelo-estructura pueden ser significativos, especialmente en términos de amplificación de desplazamientos y modificación de los periodos de vibración del sistema estructural.

En el estudio geotécnico considerado se incluye la evaluación de alternativas de cimentación superficial y profunda, lo que permitió definir de manera consistente los parámetros empleados en la modelación de los sistemas de losa de cimentación y cimentación mediante pilotes analizados en este trabajo.

El uso de un arquetipo estructural permitió establecer un marco de comparación consistente entre los modelos con base fija y base flexible, facilitando la identificación de los efectos inducidos exclusivamente por la interacción suelo-estructura y por la tipología de cimentación adoptada.

METODOLOGÍA

La metodología adoptada se orientó a evaluar el efecto de la interacción suelo-estructura (ISE) en la respuesta sísmica de una edificación representativa, mediante un enfoque analítico-numérico basado en la modelación estructural tridimensional desarrollada en el *software* ETABS v22.7, así como en la representación del sistema de cimentación mediante modelos explícitos que incorporan la flexibilidad del suelo por medio de resortes equivalentes tipo Winkler. Se compararon un modelo convencional con base fija y modelos con base flexible.

Para tal fin, se consideraron tres configuraciones de apoyo:

- Modelo con base fija, en el cual se asumió empotramiento perfecto en la base de columnas y muros, adoptado como referencia para la comparación de resultados.

- Modelo con losa de cimentación, en el que la ISE se incorporó mediante resortes equivalentes distribuidos bajo la losa, representando una cimentación superficial apoyada sobre un medio deformable.
- Modelo con cimentación profunda mediante pilotes, en el cual la edificación se apoyó sobre un sistema de pilotes modelados con rigidez axial y lateral, conectados a cabezales; adicionalmente, se evaluó la influencia de las vigas de amarre entre cabezales sobre la respuesta dinámica y las derivas laterales.

Diseño estructural bajo la hipótesis de base fija

El diseño estructural del arquetipo se realizó de acuerdo con el Reglamento NSR-10 (MVCT, 2010). El análisis sísmico se hizo por medio de un análisis modal espectral. Las verificaciones de resistencia, derivas de entrepiso y requisitos de detallado se efectuaron de acuerdo con los criterios establecidos para sistemas estructurales con capacidad de disipación de energía moderada (DMO).

Modelación de la interacción suelo-estructura

La interacción suelo-estructura (ISE) se incorporó mediante la representación de la flexibilidad del sistema de cimentación a través de resortes equivalentes tipo Winkler, siguiendo un enfoque lineal compatible con análisis espectrales. Para este propósito, se emplearon criterios y procedimientos basados en la ASCE/SEI 7-16 (ASCE, 2016), especialmente aquellos relacionados con la caracterización de rigideces del suelo y la cimentación.

Se desarrollaron dos modelos con base flexible, correspondientes a las siguientes tipologías de cimentación:

- **Losa de cimentación**, representada mediante una losa apoyada sobre resortes distribuidos que simulan la rigidez vertical y horizontal del suelo.
- **Cimentación profunda mediante pilotes**, modelada por medio de elementos de pilote con rigidez axial y lateral, conectados a cabezales, y en una etapa posterior, interconectados mediante vigas de amarre.

Esta aproximación permite representar de manera simplificada la deformabilidad del sistema suelo-cimentación y su influencia sobre la respuesta estructural global.

Estimación de los módulos de reacción del suelo

Los módulos de reacción empleados en la modelación de la ISE se estimaron a partir de parámetros geotécnicos obtenidos de un estudio de suelos disponible para el sitio. En el caso de la losa de cimentación, se calcularon módulos de reacción verticales equivalentes, considerando el módulo de elasticidad del suelo y las dimensiones de la cimentación.

Para la cimentación profunda mediante pilotes, la rigidez vertical de cada pilote se estimó a partir de la relación entre la carga axial aplicada y el asentamiento elástico correspondiente, teniendo en cuenta la deformación unitaria de cada estrato del perfil geotécnico. Adicionalmente, se incorporó un coeficiente de eficiencia para representar el efecto de interacción entre pilotes en un mismo cabezal. La rigidez horizontal se estimó como una fracción de la rigidez vertical, de acuerdo con expresiones comúnmente empleadas en la bibliografía técnica.

Con el fin de evaluar la sensibilidad de la respuesta estructural frente a la incertidumbre asociada a los parámetros del suelo, se consideraron tres escenarios de rigidez: un valor inferior, un valor nominal y un valor superior, correspondientes a variaciones del $\pm 50\%$ respecto al valor nominal. Este rango de variación se adoptó como representativo para el análisis de sensibilidad, en coherencia con el enfoque recomendado en la ASCE/SEI 7-16 (ASCE, 2016).

Consideración del amortiguamiento y espectro sísmico

Para el modelo con ISE correspondiente a la losa de cimentación, el efecto del amortiguamiento adicional asociado a la flexibilidad del sistema suelo-cimentación se incorporó mediante la construcción de un espectro de diseño sobrearmortiguado, siguiendo los lineamientos del capítulo 19 de la ASCE/SEI 7-16 (ASCE, 2016) por medio de la aplicación de un factor de corrección al espectro elástico definido para un amortiguamiento del 5 %.

En el caso del modelo con cimentación profunda mediante pilotes, no se modificó el espectro sísmico de diseño, de acuerdo con las restricciones establecidas en la ASCE/SEI 7-16 (ASCE, 2016), que limitan la modificación explícita del espectro a análisis que incorporen directamente mecanismos adicionales de disipación de energía. En consecuencia, la ISE se re-

presentó únicamente mediante la inclusión de resortes equivalentes que simulan la flexibilidad del sistema suelo-cimentación, manteniendo el espectro original y adoptando un enfoque conservador en la estimación de la demanda sísmica.

Con el fin de garantizar una comparación consistente entre los modelos con base fija y con base flexible, el espectro sobreamortiguado se construyó de manera que la demanda sísmica resultante fuera equivalente a la definida por el Reglamento NSR-10 (MVCT, 2010), manteniendo coherencia con el marco normativo colombiano.

Análisis estructural elástico

Todos los modelos desarrollados se sometieron a un análisis modal espectral, con el objeto de evaluar la respuesta estructural ante solicitaciones sísmicas de diseño. Este análisis permitió identificar los efectos asociados a la inclusión de la interacción suelo-estructura (ISE) y a la tipología de cimentación adoptada, en términos de la respuesta dinámica global del sistema.

En los modelos que incorporan la ISE se tuvieron que hacer ajustes en secciones y resistencias respecto al diseño original con base fija, como consecuencia del incremento en las demandas sísmicas inducidas por la flexibilidad del sistema de apoyo. Dichos ajustes permitieron garantizar el cumplimiento de los criterios de diseño y asegurar la coherencia entre demanda y capacidad estructural bajo análisis elástico.

Modelo estructural ajustado para análisis no lineal

En los modelos que incorporan la interacción suelo-estructura (ISE), tanto en el caso de la losa de cimentación como en el de cimentación profunda mediante pilotes, se evidenció el incumplimiento de algunos requisitos normativos debido al incremento en las demandas sísmicas asociado a la flexibilidad del sistema de apoyo, efecto que es más significativo en el modelo con pilotes. En consecuencia, fue necesario hacer ajustes en las secciones y propiedades de los elementos estructurales, con el propósito de garantizar el cumplimiento de los criterios de diseño y permitir la evaluación del desempeño estructural mediante análisis no lineales.

El rediseño se efectuó considerando el valor nominal de la rigidez del suelo, seleccionado con base en un análisis

de sensibilidad previo, el cual permitió definir una condición representativa del sistema suelo-cimentación. Este enfoque es consistente con recomendaciones internacionales para la incorporación de la interacción suelo-estructura en análisis espectrales.

Los ajustes hechos permitieron obtener modelos estructurales viables y normativamente consistentes, manteniendo la configuración general del sistema y asegurando una comparación coherente con el modelo de base fija.

Análisis estático no lineal

Como complemento al análisis elástico, se realizaron análisis estáticos no lineales mediante el método del espectro de capacidad sobre los modelos estructurales, con el fin de evaluar la respuesta no lineal global y la demanda de ductilidad. El procedimiento de análisis se desarrolló bajo control por desplazamientos, lo que permitió captar la evolución de la respuesta estructural más allá del rango elástico.

Las no linealidades se representaron mediante rótulas plásticas concentradas en vigas, columnas y muros estructurales, definidas de acuerdo con los lineamientos de la ASCE/SEI 41-23 (ASCE, 2023). Para representar el comportamiento fisurado del concreto, se adoptaron rigideces efectivas reducidas en los elementos estructurales.

En los modelos que incorporan explícitamente la interacción suelo-estructura, el procedimiento de plastificación progresiva (*pushover*) se aplicó sobre configuraciones estructurales previamente ajustadas, garantizando el cumplimiento de los requisitos normativos de resistencia, detallado y capacidad, así como la coherencia entre demanda sísmica, capacidad resistente y mecanismos de disipación de energía.

Variables de comparación

Se definieron como variables de comparación el periodo fundamental de vibración, las derivas de entrepiso, los desplazamientos globales, la participación modal de masa, la distribución de cargas axiales y la ductilidad global obtenida a partir del análisis no lineal, con el objeto de evaluar de manera consistente el efecto de la interacción suelo-estructura y de la tipología de cimentación sobre la respuesta estructural.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Comportamiento dinámico global

La incorporación explícita de la ISE produjo modificaciones significativas en el comportamiento dinámico global del arquetipo, reflejadas principalmente en el incremento de los periodos fundamentales de vibración respecto al modelo de base fija. A renglón seguido se presentan los periodos fundamentales obtenidos para el modelo de referencia y para los modelos con ISE, considerando distintas tipologías de cimentación y condiciones de rigidez del suelo (tabla 1).

Tabla 1

Periodo fundamental de vibración para los distintos escenarios de interacción suelo-estructura (modelo no ajustado)

Sistema	Condición Ks	T (s)
Base fija	N/A	1,08
Losa de cimentación	Ks reducido	2,17
	Ks nominal	1,96
	Ks superior	1,82
Pilotes	Ks reducido	2,44
	Ks nominal	2,00
	Ks superior	1,83

Fuente: Elaboración propia.

El modelo con base fija presentó un periodo fundamental de 1,08 s, adoptado como referencia. En el caso de la losa de cimentación, la inclusión de la ISE condujo a un aumento del periodo fundamental, con incrementos más pronunciados a medida que disminuye la rigidez del suelo, lo cual refleja la influencia de la deformabilidad del sistema suelo-cimentación en la respuesta global.

Para la cimentación profunda mediante pilotes, los incrementos del periodo fueron más significativos que en el caso de losa, debido a la contribución combinada de la deformabilidad axial de los pilotes y de la flexibilidad del medio de soporte.

En la tabla siguiente (tabla 2) se presentan los periodos fundamentales correspondientes al modelo con cimentación profunda para el escenario de rigidez nominal, considerando el modelo no ajustado y los modelos ajustados con y sin vigas de amarre entre cabezales. La inclusión inicial de un modelo sin vigas de

amarre permitió aislar el comportamiento del sistema suelo-pilote-estructura y evaluar de manera directa la influencia de la flexibilidad del terreno en la respuesta dinámica.

El ajuste estructural produjo una disminución del periodo fundamental, asociada al incremento de la rigidez global de la superestructura. Posteriormente, la incorporación de vigas de amarre —elementos que contribuyen a la restricción de desplazamientos en la base y a la transferencia de acciones entre apoyos— generó variaciones menores, sin modificar de un modo sustancial la tendencia general del comportamiento dinámico.

Tabla 2

Periodos fundamentales correspondientes al modelo ajustado con cimentación profunda

Configuración	T (s)
No ajustado (Ks nominal)	2,00
Ajustado sin vigas de amarre	1,88
Ajustado con vigas de amarre	1,84

Fuente: Elaboración propia.

Derivas y respuesta elástica

A renglón seguido se muestran las derivas de entrepiso obtenidas para el modelo con losa de cimentación, en diferentes escenarios de rigidez del suelo, en comparación con el modelo de base fija. En ambas direcciones principales, la inclusión de la ISE conduce a un incremento de las derivas laterales respecto al modelo con base fija, siendo este efecto más pronunciado a medida que disminuye la rigidez del suelo. Para el escenario de rigidez reducida, se observan incrementos superiores al 100 % en los niveles más exigidos (figura 3).

A continuación se pueden apreciar las derivas de entrepiso correspondientes al modelo con cimentación profunda mediante pilotes, en comparación con el modelo de base fija. En ambas direcciones principales, la inclusión de la interacción suelo-estructura (ISE) genera incrementos significativos en las derivas, los cuales resultan superiores a los observados en el caso de la losa de cimentación, particularmente en los escenarios de rigidez nominal y reducida (figura 4).

Adicionalmente, se evidencia una mayor concentración de derivas en los niveles inferiores de la estructura, comportamiento asociado a la deformabilidad axial de

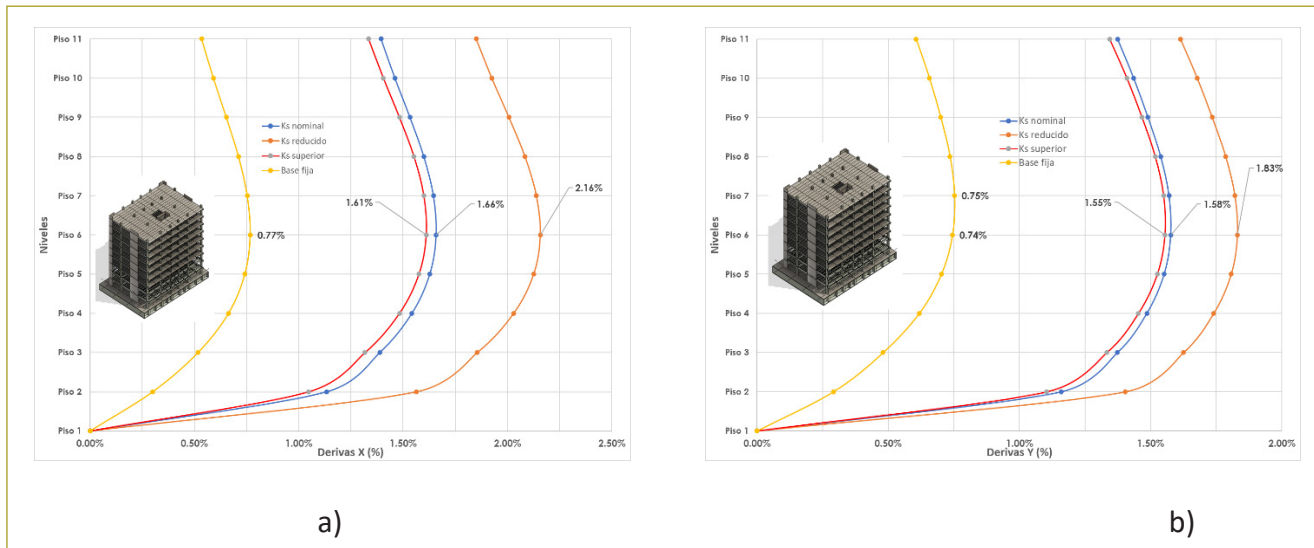


Figura 3. Derivas de entrepiso en modelos de base fija y con interacción suelo-estructura (losa de cimentación): a) dirección X; b) dirección Y

Fuente: Elaboración propia.

los pilotes y a la rotación del sistema de cimentación profunda, lo cual incrementa la participación del sistema de apoyo en la respuesta global.

En la figura siguiente (figura 5) se presenta la comparación entre el modelo con pilotes ajustado, evaluado con y sin vigas de amarre entre cabezales. La inclusión de estos elementos genera una reducción moderada de las derivas, especialmente en los niveles inferiores, y conduce a perfiles de deformación más regulares en altura, atenuando las concentraciones observadas en el modelo sin vigas.

Influencia de la tipología de cimentación

Los resultados evidencian que la tipología de cimentación ejerce una influencia significativa en la respuesta sísmica global del arquetipo estructural cuando se consideran explícitamente los efectos de la interacción suelo-estructura (ISE). En todos los casos, la inclusión de la ISE conduce a incrementos en los periodos de vibración y en las derivas laterales respecto al modelo con base rígida; sin embargo, la magnitud y el patrón de estos efectos dependen claramente del sistema de cimentación adoptado.

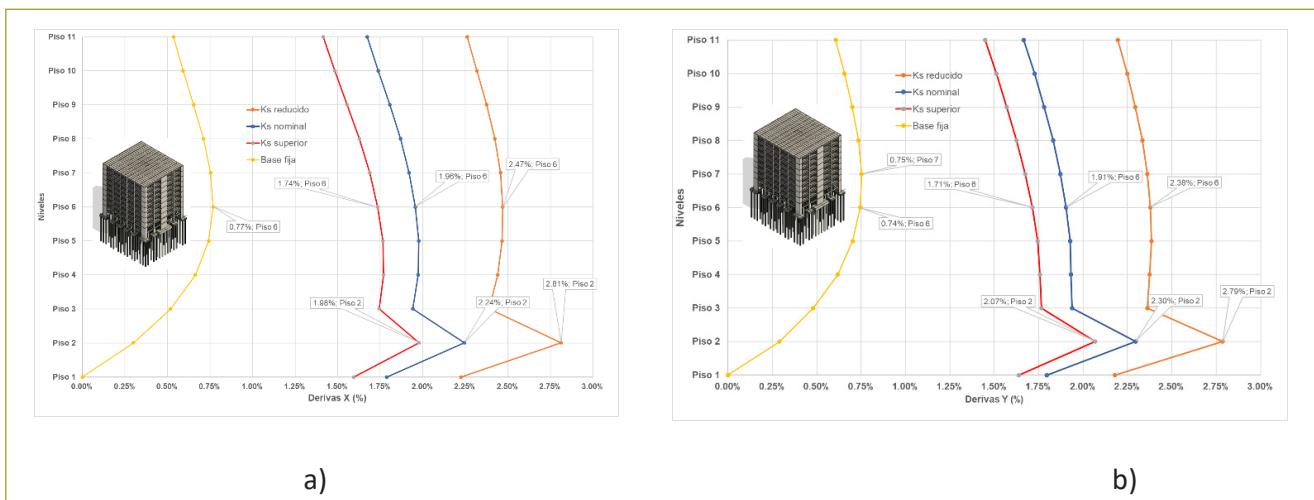


Figura 4. Derivas de entrepiso en modelos de base fija y con interacción suelo-estructura (pilotes): a) dirección X; b) dirección Y

Fuente: Elaboración propia.

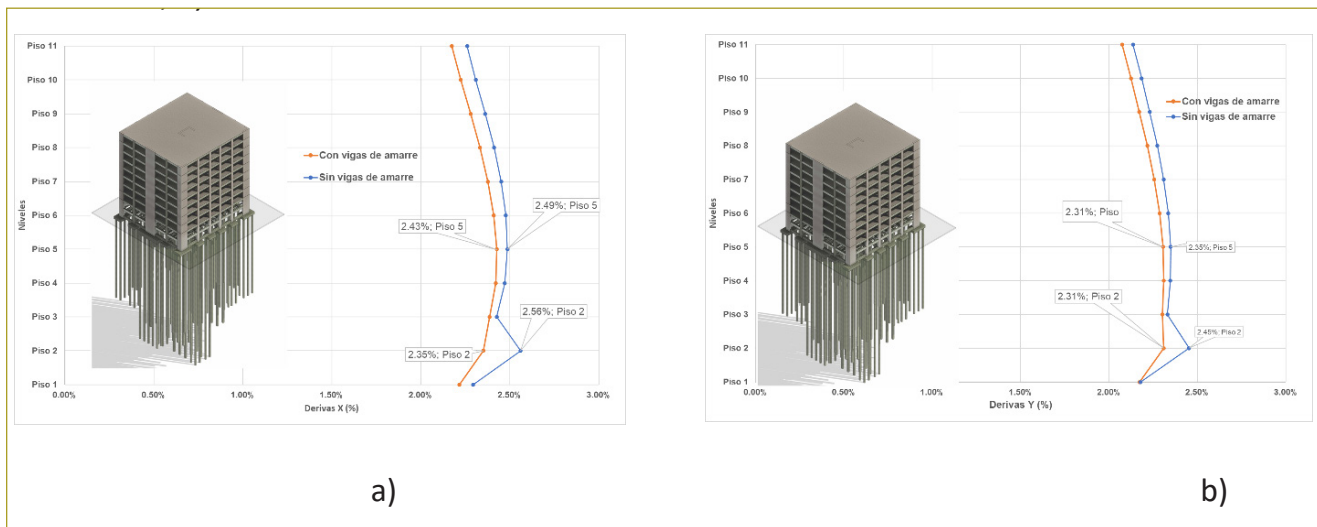


Figura 5. Derivas de la estructura ISE mediante pilotes con vigas de amarre y sin vigas de amarre: a) en dirección X; b) en dirección Y

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la losa de cimentación, la ISE se manifiesta principalmente por medio de una flexibilización global relativamente uniforme del sistema, lo que conduce a incrementos progresivos y más regulares de periodos y derivas frente a variaciones en la rigidez del suelo. Este comportamiento sugiere una menor sensibilidad de la respuesta estructural ante la incertidumbre geotécnica; por el contrario, en la cimentación profunda mediante pilotes, la respuesta sísmica muestra una mayor sensibilidad tanto a la rigidez del suelo como a la configuración del sistema de apoyo. La interacción suelo-pilote-estructura introduce mecanismos adicionales de deformación que llevan a incrementos más pronunciados de los periodos de vibración y en mayores demandas de deriva, especialmente en escenarios de rigidez reducida del suelo.

Así mismo, la incorporación de vigas de amarre entre cabezales mejora la coherencia cinemática del sistema de cimentación profunda, reduciendo deformaciones diferenciales y suavizando los perfiles de deriva, sin alterar de un modo sustancial la tendencia general asociada a esta tipología de cimentación.

Redistribución de cargas axiales

La incorporación explícita de la interacción suelo-estructura (ISE) produjo una redistribución significativa de las cargas axiales en columnas y muros estructurales

en materia de cimentación, en comparación con el modelo con base rígida. Para el escenario de rigidez nominal del suelo, se presenta el porcentaje de variación de la carga axial para el modelo con losa de cimentación (figura 6), y también se muestran los resultados correspondientes al modelo con cimentación profunda mediante pilotes (figura 7).

En el caso de la losa de cimentación, se observa una redistribución moderada de las cargas axiales, con variaciones generalmente acotadas y compensaciones entre elementos vecinos, coherentes con la mayor continuidad del sistema de cimentación superficial y una distribución más uniforme de las deformaciones; por el contrario, el modelo con cimentación profunda mediante pilotes presenta una redistribución considerablemente más pronunciada, con incrementos y descargas significativas de carga axial que alcanzan variaciones superiores al 70 % en algunos elementos. Este comportamiento se asocia a las diferencias de rigidez axial entre pilotes, determinadas principalmente por su longitud y propiedades mecánicas, lo que conduce a una mayor atracción de carga en los apoyos más rígidos y a descargas relativas en los más flexibles.

Los resultados evidencian que la ISE, sobre todo en sistemas de cimentación profunda, no solo modifica la respuesta global de la edificación, sino que también puede inducir incrementos locales relevantes de carga axial en elementos específicos de la superestructura, con

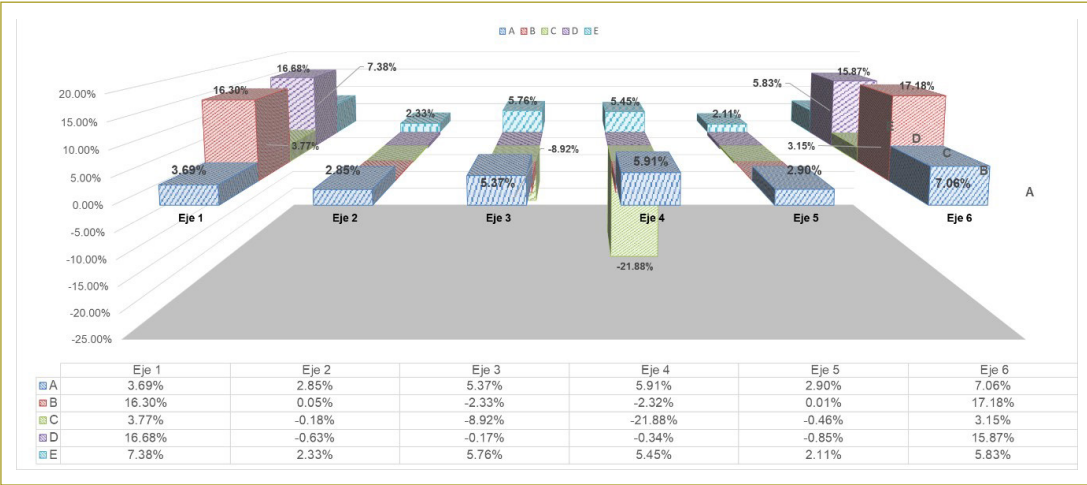


Figura 6. Porcentaje de variación de la carga axial en columnas y muros estructurales respecto al modelo de base rígida a nivel de cimentación para el caso del Ks nominal

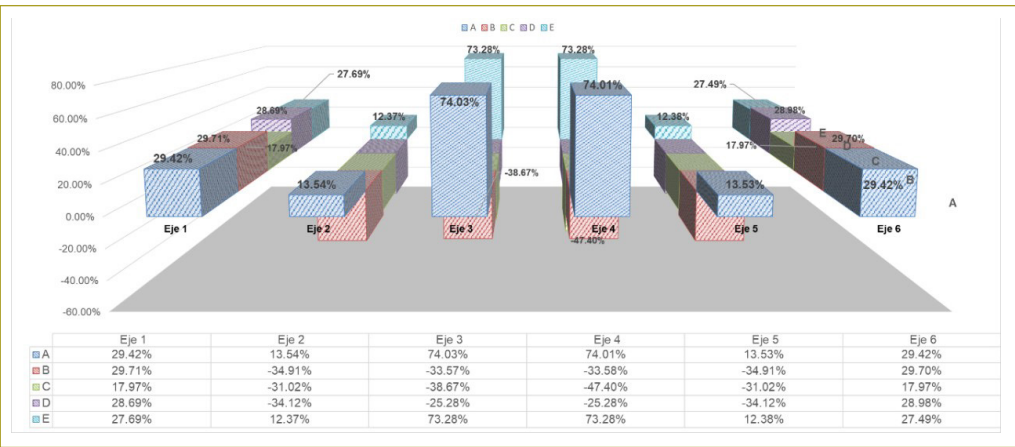
Nota: El porcentaje negativo indica descarga del elemento estructural.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Porcentaje de variación de la carga axial en columnas y muros estructurales respecto al modelo de base rígida a nivel de cimentación para el caso del Ks nominal, sistema de cimentación de pilotes

Nota: El porcentaje negativo indica descarga del elemento estructural.

Fuente: Elaboración propia.



implicaciones directas en la evaluación de la capacidad resistente y el detallado estructural.

Respuesta no lineal y ductilidad

La respuesta no lineal global del sistema estructural se evaluó mediante análisis estáticos no lineales aplicados al modelo de base rígida y a los modelos que incorporan explícitamente la interacción suelo-estructura (ISE). La comparación se centró en las curvas de capacidad, el punto de desempeño y la demanda global de ductilidad, considerando como referencia el escenario de rigidez nominal del suelo.

En esta figura (figura 8) se presenta la comparación de las curvas de capacidad obtenidas mediante análisis de plastificación progresiva (*pushover*) en el sentido X para los modelos con base fija, ISE losa e ISE pilotes. Se observa que la interacción suelo-estructura modifica la rigidez inicial y la extensión de la respuesta inelástica.

El modelo con base fija exhibe una mayor ductilidad global, mientras que los modelos con base flexible —en particular el sistema con pilotes— presentan una reducción de la ductilidad movilizada, coherente con los valores reportados en la tabla siguiente (tabla 3) y con la mayor participación del sistema suelo-cimentación en la deformación global.

Tabla 3
Parámetros obtenidos del análisis estático no lineal

Modelo	Tipología de cimentación	Desplazamiento en el punto de desempeño (mm)	Ductilidad global
Base fija	-----	421	5,01
ISE losa	Losa de cimentación	510	3,15
ISE pilotes	Pilotes	405	1,26

Fuente: Elaboración propia.

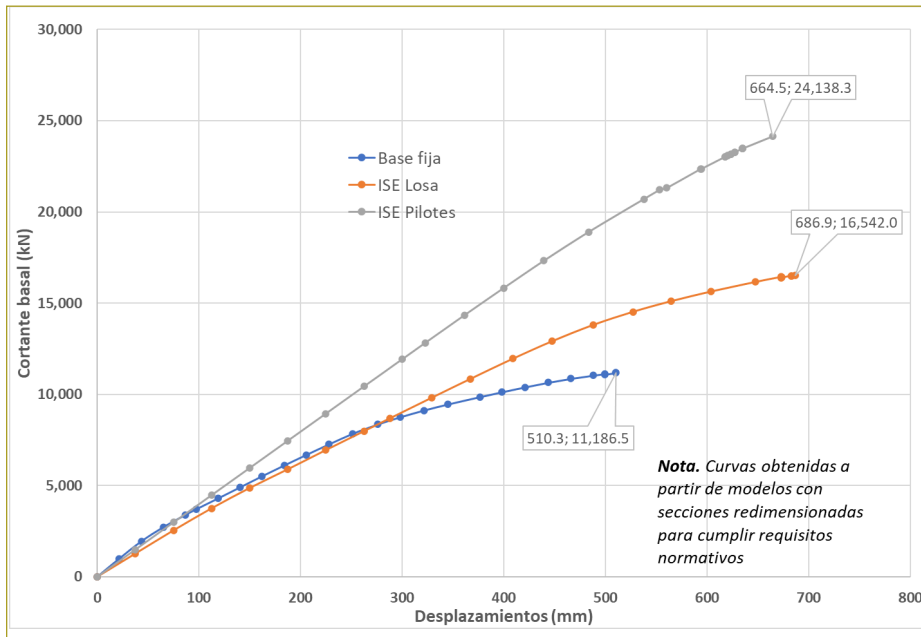


Figura 8. Comparación de las curvas de capacidad en dirección X.

En esta tabla (tabla 3) se pueden apreciar los principales parámetros globales obtenidos a partir del análisis de plastificación progresiva en la dirección X. Se observa que el modelo con base fija presenta la mayor ductilidad global ($\mu = 5,01$), asociada a una mayor movilización de deformación inelástica en la superestructura. En contraste, el modelo con losa de cimentación muestra un incremento del desplazamiento en el punto de desempeño, acompañado de una reducción de la ductilidad global, lo que indica una participación más significativa de la flexibilidad del sistema suelo-cimentación en la respuesta global.

Por su parte, el modelo con cimentación profunda mediante pilotes registra la menor ductilidad global ($\mu = 1,26$), lo que refleja una respuesta más rígida del sistema y una menor movilización inelástica de la superestructura. Este comportamiento se asocia a la redistribución de deformaciones y esfuerzos hacia el sistema de cimentación, lo cual condiciona de manera importante el desempeño no lineal del conjunto suelo-estructura.

Síntesis de resultados

Los resultados obtenidos permiten integrar de un modo coherente el efecto de la interacción suelo-estructura (ISE) sobre la respuesta sísmica del arquetipo estructural analizado. La inclusión explícita de la ISE produjo incrementos sistemáticos en los periodos fundamentales de

vibración respecto al modelo con base fija, efecto que es dependiente de la rigidez del suelo y de la tipología de cimentación, con mayores incrementos en los modelos con cimentación profunda mediante pilotes.

En materia de respuesta elástica, la consideración de la ISE condujo a incrementos relevantes en las derivas de entrepiso, especialmente en escenarios de rigidez reducida del suelo. En los modelos con pilotes se identificaron concentraciones de deriva en los niveles inferiores, asociadas a la flexibilidad del sistema de cimentación, mientras que la incorporación de vigas de amarre permitió perfiles de deformación más regulares a lo largo de la altura.

La redistribución de cargas axiales evidenció que la ISE modifica en forma apreciable la demanda axial en columnas y muros, efectos que son más pronunciados en la cimentación profunda debido a las diferencias de rigidez axial entre pilotes. Así mismo, los análisis estáticos no lineales mostraron que la inclusión de la ISE reduce la ductilidad global movilizada en la superestructura, al redistribuir parte de la deformación hacia el sistema suelo-cimentación.

Desde el punto de vista del diseño estructural, estos resultados indican que la hipótesis de base fija no siempre conduce a estimaciones conservadoras, particularmente en suelos deformables y en sistemas con cimentación profunda. La no consideración de la ISE puede implicar una subestimación de la demanda

de desplazamientos, de las derivas y de la demanda axial en elementos estructurales, afectando tanto las verificaciones de servicio como de resistencia. En este contexto, la tipología de cimentación adquiere un papel determinante en la respuesta global, mientras que la inclusión de vigas de amarre contribuye a mejorar la regularidad de la respuesta, sin modificar sustancialmente el comportamiento global.

Finalmente, la reducción de la ductilidad global observada sugiere una mayor participación del sistema suelo-cimentación en la disipación de energía, aspecto que se debe tomar en cuenta en la evaluación del desempeño sísmico.

Alcances y limitaciones

El presente estudio se basa en un arquetipo estructural representativo de edificaciones de mediana altura con sistema combinado de pórticos y muros de concreto reforzado, diseñado conforme a la NSR-10. El análisis se centra en evaluar comparativamente los efectos de la interacción suelo-estructura (ISE) mediante modelos numéricos tridimensionales que incorporan distintas tipologías de cimentación y condiciones de rigidez del suelo en un mismo escenario de demanda sísmica.

Los resultados permiten identificar tendencias en la influencia de la ISE sobre la respuesta dinámica, las derivas, la redistribución de cargas axiales y el comportamiento no lineal. No obstante, estos hallazgos corresponden a las condiciones particulares del arquetipo y del perfil geotécnico considerado, caracterizado por suelos deformables.

Entre las principales limitaciones se encuentran el uso de un solo modelo estructural y de un conjunto específico de propiedades del suelo, lo cual restringe la extrapolación directa de los resultados a otras tipologías o condiciones de sitio. Adicionalmente, la interacción suelo-estructura se representó mediante modelos equivalentes basados en resortes, sin incorporar explícitamente el comportamiento no lineal del suelo ni análisis dinámicos en el dominio del tiempo para todos los casos.

En consecuencia, los resultados se deben interpretar como una evaluación comparativa en condiciones controladas, orientada a evidenciar la magnitud y tendencia de los efectos de la ISE más que a establecer valores generalizables para el diseño. En futuras investigaciones

se podría ampliar el alcance mediante el análisis de múltiples arquetipos, variabilidad en las condiciones de sitio y modelos avanzados de interacción suelo-estructura con comportamiento no lineal del suelo.

CONCLUSIONES

- La interacción suelo-estructura (ISE) modifica notablemente la respuesta sísmica del arquetipo estructural analizado, generando incrementos en los periodos fundamentales de vibración y en las derivas de entrepiso respecto al modelo con base fija. Estos efectos dependen de la rigidez del suelo y de la tipología de cimentación, pero son más pronunciados en sistemas de cimentación profunda mediante pilotes.
- La consideración explícita de la ISE conduce a una respuesta estructural más flexible y realista, evidenciando que la hipótesis de base fija puede subestimar tanto la demanda de desplazamientos como la deformabilidad global del sistema, sobre todo en suelos blandos. En cimentaciones profundas, se identifican además concentraciones de deriva en los niveles inferiores, asociadas a la deformabilidad del sistema de apoyo, las cuales se pueden mitigar parcialmente con la incorporación de vigas de amarre.
- La ISE induce una redistribución significativa de las cargas axiales en columnas y muros estructurales, en especial en sistemas con pilotes, donde las diferencias de rigidez axial generan concentraciones locales de carga. Este comportamiento resalta la importancia de considerar la compatibilidad de deformaciones y la interacción suelo-cimentación en el diseño estructural, a causa de su impacto directo en la verificación de resistencia y el detallado de los elementos.
- Desde el punto de vista del diseño estructural, los resultados evidencian que la no consideración de la interacción suelo-estructura (ISE) puede conducir a estimaciones no conservadoras de la demanda sísmica, particularmente en términos de desplazamientos, derivas y cargas axiales. En consecuencia, la inclusión explícita de la ISE, sobre todo en edificaciones con cimentación profunda y suelos deformables, resulta relevante para una evaluación más realista del desempeño estructural y para la verificación adecuada de los estados límite de servicio y resistencia.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por el apoyo académico brindado, así como a los docentes y asesores que acompañaron el desarrollo de este estudio

Autoría

El presente artículo se deriva de una tesis de grado de maestría. La autoría principal corresponde a Jahir Rodríguez, quien elaboró la versión inicial del manuscrito. Sandra Jerez actuó como directora de la tesis y participó en la revisión crítica del contenido, así como en la modificación y mejora del artículo final.

REFERENCIAS

- American Society of Civil Engineers (2016). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-16)*. ASCE.
- American Society of Civil Engineers (2023). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (ASCE/SEI 41-23)*. ASCE.
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering* (5th ed.). Pearson Education.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice-Hall.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio y Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (MVCT, 2010) (Ley 400 de 1997 y Decreto 926 de 2010). MVCT y AIS.
- Panda, S. K., Ghosh, B., y Chakraborty, S. (2024). Estimation of response reduction factor for Indian standard code designed reinforced concrete frames considering nonlinear soil-structure interaction effects. *Structure and Infrastructure Engineering*, 20(6), 875-892. <https://doi.org/10.1080/15732479.2023.2248157>
- Sharma, A., Ghosh, B., y Chakraborty, S. (2025). Influence of soil-pile foundation-structure interaction on the ductility capacity of RC buildings. *Structures*, 63, 1057-1072. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.10.061>
- Shi, Y., He, Z., Han, J., Ding, Y., y Qin, H. (2026). Constant-strength ductility factor spectra of SDOF systems considering soil-structure interaction effects subjected to ground motions of the 2023 Mw 7.7 Pazarcık earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 179, 109874. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109874>
- Wolf, J. P. (1985). *Dynamic soil-structure interaction*. Prentice-Hall.

Modelos VAR y Garch multivariado para la proyección del precio de las acciones de Amazon y análisis de volatilidad (2019-2023)

Multivariate VAR and Garch models to project Amazon share prices and volatility analysis (2019-2023)

MARÍA CONSTANZA TORRES TAMAYO¹ - ÁLVARO HERNANDO CHAVES CASTRO² - ALBERTO ALEJANDRO CHAPARRO VIRACACHÁ³

1. Magíster en Dirección Financiera. Economista. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. maria.torrest@escuelaing.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1869-6080>.

2. Magíster en Economía. Economista. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. alvaro.chaves@escuelaing.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1865-3558>.

3. Economista con énfasis en Finanzas. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. alejandrochaparro11@outlook.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1899-7812>.

Recibido: 25/09/2025 Aceptado: 30/10/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Durante el periodo 2019-2023, caracterizado por *shocks* macroeconómicos de alta magnitud —entre estos, la pandemia de covid-19 y episodios de inflación acelerada en Estados Unidos—, la predicción del precio de activos de alta capitalización como Amazon (AMZN) representa un desafío metodológico relevante para la gestión del riesgo financiero.

Por tal razón, en este artículo se construye y evalúa un enfoque de modelado integrado que combina un modelo VAR (vector autorregresivo) multivariado de orden 6, un modelo Garch (1,1) para la volatilidad condicional y el cálculo del valor en riesgo (VaR) mediante cuatro metodologías complementarias. El modelo VAR incorpora el PIB trimestral de Estados Unidos, el índice CPI-U y el S&P 500 como variables exógenas, proyectadas previamente mediante modelos Arima seleccionados con criterios AIC y BIC. La novedad del enfoque radica en aplicar el VaR sobre los precios proyectados mediante un modelo de vectores autorregresivos (VAR) —no sobre precios históricos—, convirtiendo esta métrica en un indicador de riesgo prospectivo integrado al modelo predictivo.

Los resultados evidencian convergencia entre metodologías de VaR (Monte Carlo: -3,79 %; Delta Histórico: -3,65 %; EWMA: -2,19 %), validando la consistencia interna del modelo. El Garch (1,1) confirma persistencia significativa de la volatilidad en AMZN ($\alpha = 1,000$), mientras el VAR de orden 6 captura la dinámica conjunta entre el precio de la acción y los fundamentos macroeconómicos. El VaR prospectivo

sobre proyecciones alcanzó -0,3993 (IC 95 %), indicando pérdidas moderadas esperadas en el horizonte trimestral.

Estos hallazgos sugieren que la integración de herramientas económicas multivariadas mejora sustancialmente la capacidad de gestión del riesgo en carteras con exposición a acciones tecnológicas de alta capitalización.

Palabras claves: VAR multivariado, Garch, valor en riesgo, proyección de precios, series temporales financieras.

Abstract

During 2019-2023, a period marked by high-magnitude macroeconomic shocks—including the Covid-19 pandemic and accelerated inflation in the United States—predicting the price of high-capitalization assets such as Amazon (AMZN) poses a relevant methodological challenge for financial risk management.

For this reason, this paper constructs and evaluates an integrated modeling approach combining a multivariate VAR (Vector Autoregression) model of order six, a Garch (1,1) model for conditional volatility, and Value at Risk (VaR) estimation using four complementary methodologies. The VAR model incorporates US quarterly GDP, the CPI-U index, and the S&P 500 as exogenous variables, previously projected using Arima models selected by AIC and BIC criteria. The novelty lies in applying VaR to VAR-projected prices—rather than historical

prices— thereby transforming this metric into a prospective risk indicator integrated within the predictive model.

Results show convergence across VaR methodologies (Monte Carlo: -3.79% ; Delta Historical: -3.65% ; EWMA: -2.19%), validating the models' internal consistency. The Garch (1,1) confirms significant volatility persistence in AMZN ($\alpha = 1.000$), while the order-6 VAR captures the joint dynamics between the stock price and macroeconomic fundamentals. The prospective VaR over projections reached -0.3993 (95 % CI), indicating moderate expected losses over the projected quarterly horizon.

These findings suggest that integrating multivariate econometric tools improve risk management capacity for portfolios exposed to high-capitalization technology stocks.

Keywords: Multivariate VAR; Garch; Value at Risk; price projection; financial time series.

INTRODUCCIÓN

La predicción del precio de activos financieros en mercados volátiles constituye uno de los problemas centrales de la econometría financiera aplicada. La complejidad se intensifica cuando el activo analizado pertenece a un sector de alta sensibilidad macroeconómica y experimenta *shocks* estructurales de consideración, como ocurrió con Amazon (AMZN) durante el periodo 2019-2023. En ese lapso, el mercado global enfrentó la pandemia de covid-19, una recuperación económica asimétrica, el ciclo inflacionario más agudo de las últimas cuatro décadas en Estados Unidos y el consecuente endurecimiento de la política monetaria de la Reserva Federal. Todos estos eventos generaron episodios de alta volatilidad en el precio de AMZN, incluyendo el *split* de acciones 20:1 ejecutado en junio de 2022, que redujo el precio unitario de aproximadamente USD 3.000 a USD 150, ampliando el acceso de inversores minoristas.

Desde el punto de vista del activo analizado, Amazon constituye un caso de estudio interesante. Fundada en 1994 y con cotización en el Nasdaq desde 1997 (precio inicial: USD 18), la empresa pasó de ser una librería en línea a convertirse en la tercera mayor empresa del S&P 500 por capitalización de mercado en 2023, con más de 1,5 millones de empleados en el ámbito global. Su trayectoria bursátil refleja la complejidad de modelar un activo cuya valoración incorpora expectativas de crecimiento a largo plazo en un entorno de alta incertidumbre. La incorporación de variables macroeconómicas en el modelo predictivo busca captar precisamente esa dimensión sistémica del riesgo que los modelos univariados no pueden observar.

En este contexto, la pregunta que orienta esta investigación es la siguiente: ¿en qué medida la integración de un modelo (VAR)¹ multivariado —con el producto interno bruto (PIB), inflación y S&P 500 como variables exógenas—, un modelo Garch² para la volatilidad condicional y el análisis VaR³ permite proyectar el precio de la acción de Amazon (AMZN) y cuantificar el riesgo de pérdida asociado a dicha inversión durante el periodo 2019-2023?

La hipótesis central sostiene que dicha integración produce proyecciones con mayor capacidad explicativa que los enfoques univariados, y genera estimaciones de riesgo consistentes entre distintas metodologías (paramétrica, histórica y simulación de Monte Carlo) para el periodo analizado.

La contribución del artículo es doble. En primer término, propone un marco de modelado que vincula la dinámica de precios con fundamentos macroeconómicos mediante un VAR de orden 6 estimado con validación cruzada y selección de hiperparámetros por AIC/BIC⁴. En segundo lugar, aplica el VaR sobre los precios proyectados por el VAR —no sobre la serie histórica—, convirtiendo al VaR en una métrica de riesgo prospectiva, integrada al modelo predictivo. Este enfoque resulta especialmente relevante para gestores de riesgo que requieren no solo proyecciones de precio, sino también cuantificación del riesgo asociado en horizontes definidos. El artículo se organiza así: primero se revisa la bibliografía, luego se describen los datos y la metodología, después se presentan resultados y discusión, y por último, se formulan las conclusiones.

1. Es una herramienta para el análisis multivariado de series de tiempo denominada vectores autorregresivos (VAR).
2. Hace referencia a un modelo de volatilidad para la varianza autorregresivo generalizado con heterocedasticidad condicionada (Garch, por su sigla en inglés).
3. Valor en riesgo (VaR, por su sigla en inglés) es un modelo estadístico que estima la pérdida máxima esperada de una cartera o posición financiera en un horizonte de tiempo determinado, dado un nivel de confianza específico; generalmente, se encuentra entre 95 % y 99 %.
4. Son los criterios estadísticos de Akaike y bayesiano de Schwartz que permiten escoger los modelos más robustos desde el punto de vista estadístico.

REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA

La modelación de la volatilidad condicional en series financieras tiene sus fundamentos en el trabajo seminal de Engle (2001), quien demostró que la varianza de los rendimientos exhibe dependencia temporal —fenómeno conocido como *volatility clustering*— y que su captura mejora la estimación del riesgo. La extensión generalizada Garch (p,q) propuesta por Bollerslev (1986) sigue siendo la especificación de referencia en el análisis de volatilidad de activos de renta variable, con amplia evidencia empírica de su superioridad frente a modelos de volatilidad constante.

En cuanto a la predicción multivariada de precios, los modelos VAR introducidos por Sims (1980) ofrecen un marco flexible para captar interdependencias dinámicas entre series financieras y macroeconómicas, sin imponer restricciones de exogeneidad *a priori*. Stock y Watson (2001) documentaron que la inclusión de variables macroeconómicas como el PIB y la inflación mejora la capacidad predictiva de los modelos VAR frente a especificaciones univariadas, particularmente en horizontes cortos y medianos.

La cuantificación del riesgo mediante el VaR tiene su marco normativo en los Acuerdos de Basilea, que desde Basilea II establecen el VaR como el instrumento estándar para la medición del riesgo de mercado en instituciones financieras. Jorion (2007) sistematizó las principales metodologías —paramétrica, histórica y Monte Carlo—, y señaló sus ventajas y limitaciones relativas. En el contexto latinoamericano, Caicedo y Castañeda (2022) aplicaron metodologías VaR para la gestión del riesgo de mercado en activos de la Bolsa de Valores de Colombia, mientras que Alarcón, Galeano y Villamil (2021) analizaron el riesgo financiero de contratos de futuros de agua entre 2019 y 2021, evidenciando la utilidad del enfoque para activos con alta volatilidad.

La relación entre variables macroeconómicas y precios de acciones ha sido ampliamente documentada. Fama (1990) y Schwert (1990) encontraron que los rendimientos del mercado accionario están correlacionados con la actividad económica real, y con el producto interno bruto (PIB) mostrando poder predictivo significativo sobre los precios. En el caso de las acciones tecnológicas, esta relación es especialmente pronunciada debido a su alto componente de crecimiento futuro descontado: cambios en las tasas de interés —determi-

nadas en parte por la inflación— afectan directamente la valoración por flujos de caja descontados.

En lo referente a la selección de modelos de series de tiempo, Akaike (1974) introdujo el criterio AIC y Schwarz (1978) el BIC, herramientas estándar para la comparación de especificaciones en modelos financieros. Ambos criterios penalizan la complejidad del modelo de manera diferente: el AIC aplica una penalización de $2k$ (donde k es el número de parámetros), mientras que el BIC aplica $\ln(n)k$ (donde n es el tamaño de la muestra), siendo este último más restrictivo con modelos sobreparametrizados. En el presente artículo se aporta evidencia empírica para AMZN durante un periodo de particular exigencia metodológica, caracterizado por disrupciones estructurales que limitaron la capacidad predictiva de los modelos univariados.

METODOLOGÍA

Datos

Se utilizaron datos trimestrales del periodo comprendido entre el primer trimestre de 2019 y el cuarto trimestre de 2023. Las variables incluidas son: a) el precio ajustado de cierre de AMZN expresado en logaritmos; b) el producto interno bruto (PIB) trimestral de Estados Unidos, obtenido del Bureau of Economic Analysis; c) el índice de precios al consumidor urbano (CPI-U), publicado por la Oficina de Estadísticas Laborales (BLS), y d) el índice S&P 500, como referencia del mercado bursátil amplio. Los precios de AMZN y el S&P 500 se obtuvieron de Investing.com en periodicidad diaria y se agregaron a frecuencia trimestral, al tiempo que se ajustó la serie de precios de AMZN para reflejar el *split* 20:1 de junio de 2022, manteniendo la comparabilidad a lo largo del periodo. Para el VaR financiero se emplearon datos diarios del 2 de enero de 2019 al 2 de enero de 2024, con un monto de referencia de 5.000 millones de acciones. Todos los modelos se estimaron en Python, con las librerías *statsmodels* (Arima y VaR), ARCH y Garch.

Cálculo del valor en riesgo (VaR)

El VaR se estimó mediante cuatro metodologías con un nivel de confianza del 95 %. Los rendimientos logarítmicos se calcularon como $\text{Rend}_t = \ln(P_t/P_{t-1})$. La metodología Delta normal asume distribución normal y

estima el VaR como $VaR = S * \sigma * F * \sqrt{t}$, donde S es el monto invertido, σ la volatilidad histórica, F el número de desviaciones estándar y t el horizonte en semanas. El método EWMA (JP Morgan, $\lambda = 0,95$) estima la varian-za dinámica como $\sigma_t^2 = (1 - \lambda) \sum_{i=1}^{\infty} \lambda^{i-1} R_{t-i}^2$. La simu-lación histórica aplica rendimientos históricos al precio actual mediante $P_n = P_1 * e^{R_d}$. Finalmente, la simulación de Monte Carlo con Risk Simulator determinó la mejor distribución estadística de los rendimientos mediante el criterio de Kolmogorov-Smirnov, ejecutando 5.000 ensayos, y el VaR se obtuvo como el percentil del 5 % de la distribución simulada.

Proyección de variables exógenas mediante Arima

Las variables macroeconómicas (PIB e inflación) se proyectaron mediante modelos Arima⁵ seleccionados por mínimo AIC y BIC. Para el PIB, el modelo óptimo resultó ser un Arima (1,1,1) ajustado con la función auto.arima, con residuos sin autocorrelación significativa (prueba de Ljung-Box, $p > 0,05$). Para la inflación (CPI-U), el modelo seleccionado fue un Arima en dife-rencias logarítmicas, validado mediante corroboración de proyecciones contra valores observados.

La incorporación del PIB y la inflación (CPI-U) como variables exógenas sigue la extensión conocida como (VARX)⁶ (Lütkepohl, 2005, cap. 10), que permite acomodar la influencia de variables externas sin modelar su retroalimentación desde el sistema endógeno. Este tratamiento se fundamenta en el concepto de exoge-neidad débil de Engle, Hendry y Richard (1983), en el cual una variable se puede tratar como condicionante del sistema cuando los parámetros de interés no de-penden del proceso marginal que la genera. Desde una perspectiva económica, este supuesto es plenamente justificable: el precio de la acción de Amazon, siendo un activo individual, carece de capacidad para afectar los agregados macroeconómicos de Estados Unidos a un nivel estadísticamente significativo, por lo que la hipótesis de no causalidad en sentido Granger desde

el sistema endógeno hacia el PIB e inflación resulta coherente con la bibliografía.

El análisis se complementa con modelos de la familia ARCH⁷/Garch y la estimación del valor en riesgo (VaR), reconociendo que el pronóstico de precios accionarios involucra dos dimensiones distintas pero relacionadas: la dinámica de los niveles y la evolución de la volatilidad. Mientras el VAR capta las interdependencias entre va-riables en media, los modelos Garch permiten modelar la heterocedasticidad condicional característica de los retornos financieros (Engle, 1982; Bollerslev, 1986), y el VaR traduce estas estimaciones en una medida de riesgo interpretable para la toma de decisiones. La combina-ción de estas estrategias econométricas responde a la naturaleza multidimensional del pronóstico financiero, donde ningún modelo único capta en forma suficiente tanto la tendencia como la incertidumbre asociada.

Modelo VAR multivariado

Se estimó un modelo VAR multivariado que relaciona el precio de AMZN con las variables macroeconómicas proyectadas anteriormente. El orden óptimo se deter-minó mediante validación cruzada y criterios AIC/BIC, resultando en un VAR (6). El modelo final incorpora seis rezagos de cada variable (AMZN, S&P 500, infla-ción y PIB) y un componente de tendencia polinomial de segundo orden.

Se presentan los coeficientes estimados del modelo VAR 2 para la ecuación de los rendimientos trimestrales de Amazon (AMNZt), organizados en el panel A por variable y rezago, y las métricas globales de ajuste en el panel B. En cuanto a los términos deterministas, el intercepto positivo (+0,355) sugiere una tendencia base de crecimiento en los rendimientos, mientras que los coeficientes de tendencia lineal (-0,010) y cuadrática (+0,0002) indican una trayectoria inicialmente decre-ciente que se modera en el tiempo. Entre las variables rezagadas, se destacan los coeficientes negativos y de magnitud elevada del PIB en los rezagos 2, 3 y 4 (-3,944; -2,875; -3,046), lo que sugiere que expan-siones del producto rezagadas se asocian con caídas posteriores en los rendimientos de AMNZ, reflejando

5. Se refiere a un modelo univariado de series de tiempo con componentes autorregresivos (AR), integrado (I) y de promedios móviles (MA).
6. Es un modelo de vectores autorregresivos que incorpora variables exógenas (X) en su construcción.

7. Son modelos de volatilidad de la varianza autorregresivos, con heterocedasticidad condicional.

Tabla 1
Coeficientes estimados del modelo VAR 2 (ecuación de AMNZt)

Panel A. Coeficientes estimados por variable y rezago. Variable dependiente: AMNZt					
Rezago	Variable	Coeficiente	Rezago	Variable	Coeficiente
—	Constante	+0,354637	t	Tendencia (t)	−0,010084
t ²	Tendencia (t ²)	+0,000202			
t−1	AMNZt−1	−0,116519	t−1	S&P 500t−1	−0,448238
t−1	Inflaciónt−1	−0,014306	t−1	PIBt−1	−2,231289
t−2	AMNZt−2	−0,501327	t−2	S&P 500t−2	+1,277411
t−2	Inflaciónt−2	+0,011722	t−2	PIBt−2	−3,944298
t−3	AMNZt−3	−0,023705	t−3	S&P 500t−3	+0,936889
t−3	Inflaciónt−3	−0,004761	t−3	PIBt−3	−2,875310
t−4	AMNZt−4	+0,126578	t−4	S&P 500t−4	+0,322878
t−4	Inflaciónt−4	−0,003130	t−4	PIBt−4	−3,046383
t−5	AMNZt−5	+0,267221	t−5	S&P 500t−5	−1,439507
t−5	Inflaciónt−5	+0,003140	t−5	PIBt−5	+0,752163
t−6	AMNZt−6	−0,609474	t−6	S&P 500t−6	+0,640638
t−6	Inflaciónt−6	−0,006169	t−6	PIBt−6	−1,193857

Panel B. Métricas globales del modelo VAR 2			
Log-Likelihood	+199,187	AIC	−16,5622
BIC	−11,7628	HQIC	−14,9054
FPE	4,83×10 ^{−7}	Rezagos ópt.	6 (trend: ctt)
Variables	4	N obs.	Ver nota ²

Nota: Estimado sobre rendimientos trimestrales pct_change() de AMNZ y S&P 500; inflación y PIB en niveles. Selección por validación cruzada (maxlags=6, trend='ctt').

² Errores estándar, t-estadísticos y p-valores disponibles bajo solicitud a los autores (Lütkepohl, 2005).

Fuente: Elaboración propia a partir de un modelo VAR.

posiblemente ciclos de corrección tras periodos de crecimiento económico sostenido.

El S&P 500 muestra coeficientes alternantes en signo a lo largo de los rezagos, con valores positivos en t−2 (+1,277) y t−3 (+0,937) y negativos en t−1 (−0,448) y t−5 (−1,440), lo que es consistente con dinámicas de reversión a la media propias de activos de alta capitalización (Lütkepohl, 2005). Las métricas del panel B confirman la adecuación global del modelo: el AIC de −16,56 y el BIC de −11,76 representan una mejora sustancial frente al modelo VAR 1 (AIC = +26,15), validando la transformación a rendimientos y la selección de seis rezagos con tendencia cuadrática.

Modelo Garch para la volatilidad condicional

Para captar la heterocedasticidad condicional en los rendimientos de AMZN, se estimó inicialmente un modelo ARCH. La ecuación de media es $r_t = \bar{r} + \delta_{t-1} + \varepsilon_t$, y la ecuación de varianza condicional del Garch (p,q) es $\sigma_t^2 = \omega + \sum \alpha_p \varepsilon_{t-p}^2 + \sum \beta_q \sigma_{t-q}^2$. Dado que el modelo ARCH inicial mostró correlación serial residual significativa, se adoptó el Garch (1,1) como especificación

final, justificado por la superioridad de sus criterios de información (AIC = −94,47, BIC = −88,25 comparado con un ARCH: AIC = −96,47, BIC = −91,80) y la significancia estadística de α_1 ($p = 0,012$).

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Resultados del VaR histórico

A continuación, se resumen los resultados del VaR calculado sobre datos históricos de AMZN (2019-2024) con las cuatro metodologías implementadas (tabla 2).

La convergencia entre metodologías es notable: tres de las cuatro arrojan valores entre −3,16 % y −3,65 %, con Monte Carlo en −3,79 %. Esta consistencia valida la robustez del análisis de riesgo. La metodología EWMA⁸

8. EWMA (Exponentially Weighted Moving Average). Método estadístico de suavizamiento de series de tiempo que asigna pesos exponencialmente decrecientes a observaciones pasadas, priorizando datos recientes. Se emplea ampliamente en la estimación de volatilidad y gestión de riesgos financieros.

muestra el menor VaR (-2,19 %), reflejo de su mayor sensibilidad a los rendimientos recientes, que en el año 2023 mostraron una recuperación sostenida de AMZN, en tanto que la simulación de Monte Carlo identificó la distribución de Laplace como la mejor aproximación a los rendimientos históricos (criterio Kolmogorov-Smirnov), seguida de la distribución logística, sugiriendo colas más pesadas que la normal, resultado consistente con la evidencia empírica sobre rendimientos de activos tecnológicos.

Tabla 2

Resultados comparativos de metodologías VaR (IC 95 %, monto base: 5.000 millones de acciones)

Metodologías	VaR (%)	VaR (USD)
Delta histórico	-3,65 %	-27,35 billones
EWMA	-2,19 %	-16,38 billones
Simulación de probabilidad	-3,16 %	-23,69 billones
Simulación histórica	-3,32 %	-24,88 billones
Monte Carlo (Risk Simulator)	-3,79 %	—

Fuente: Elaboración propia a partir de la estimación de un modelo VAR.

Proyecciones de variables exógenas

Los modelos Arima para PIB e inflación ofrecieron proyecciones razonables, validadas contra datos observados. El PIB de Estados Unidos mostró una trayectoria de recuperación moderada pospandemia, mientras que la inflación exhibió el pico característico de 2022 y el inicio de la desaceleración en 2023. Estas proyecciones se incorporaron como variables exógenas en el modelo VAR, dotándolo de un componente prospectivo macroeconómico ausente en los modelos univariados.

Estimación y resultados del modelo VAR

La selección del orden óptimo mediante validación cruzada resultó en un VAR de orden 6, lo que implica que el precio de AMZN depende de los seis trimestres anteriores de todas las variables del sistema. La Tabla 3 resume las métricas de ajuste del modelo final.

El coeficiente del S&P 500 en el rezago $t-1$ (-0,4482) indica una relación negativa a corto plazo entre el índice rezagado y el precio de AMZN, interpretable como ajuste de portafolio cuando el mercado amplio sube. Los coeficientes del S&P 500 en rezagos

$t-2$ y $t-3$ son positivos y considerables (1,277 y 0,937), lo que indica que la tendencia del mercado amplio predice el precio de AMZN con dos y tres trimestres de rezago. Los coeficientes del PIB en varios rezagos muestran magnitudes elevadas (entre -2,2 y -3,9), las cuales reflejan la alta sensibilidad de las acciones tecnológicas al ciclo económico.

Tabla 3

Métricas de ajuste del modelo VAR (6) final

Criterio	Resultado
Orden del VAR (por AIC/BIC)	6
Correlación residuales AMZN-S&P 500	Baja, no significativa
Durbin-Watson (ecuación AMZN)	~2,0 (sin autocorrelación serial)
Validación cruzada	Convergente

Fuente: Elaboración propia, a partir de la estimación de un modelo VAR.

Resultados del modelo Garch

Los resultados del Garch (1,1) con sus coeficientes estimados se presentan en la ecuación (2) y confirman la presencia de agrupamiento de volatilidad en AMZN. El coeficiente $\alpha_1 = 1,000$ indica que el impacto de los errores al cuadrado del periodo anterior en la varianza condicional es total, implicando alta persistencia de los *shocks* de volatilidad. El parámetro $\omega = 1,0872 \times 10^{-3}$ sugiere un nivel base de volatilidad relativamente bajo, lo que sugiere a su vez una volatilidad relativamente estable en la serie, al menos en comparación con otras fuentes de variabilidad.

$$(2) \hat{\sigma}_{t-AMZN}^2 = 1,0872 \times 10^{-3} + 1,000 \hat{\varepsilon}_{t-1}^2$$

Para la serie temporal de S&P 500 (ecuación 3), el coeficiente α es 0,0663, lo que indica un impacto moderado del error al cuadrado en el periodo anterior en la varianza condicional. Esto sugiere que la serie exhibe cierta persistencia en la volatilidad. El valor de ω es $8,7329 \times 10^{-4}$, lo que indica una componente constante de volatilidad en el modelo Garch. Similar a AMZN, el modelo no incluye un componente ARMA. El log-likelihood es positivo (72,5503), y tanto el AIC como el BIC son negativos, lo que indica un buen ajuste del modelo.

$$(3) \hat{\sigma}_{t-SP500}^2 = 8,7329 \times 10^{-4} + 0,0663 \hat{\varepsilon}_{t-1}^2$$

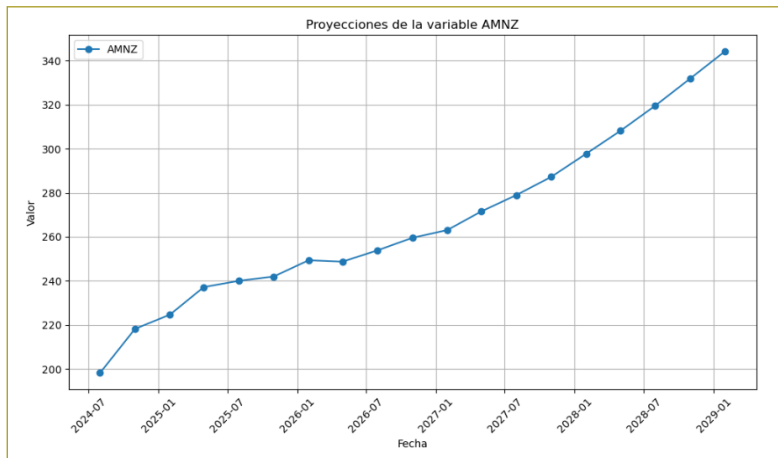


Figura 1. Proyecciones del precio de AMZN, modelo VAR(6)

Fuente: Elaboración propia, a partir de la estimación de un modelo VAR.

Por su parte, la ecuación (4) presenta la estimación del modelo Garch para la serie temporal de inflación, cuyo coeficiente α es 0,9150, lo que sugiere un impacto significativo del error al cuadrado en el periodo anterior en la varianza condicional. Esto apunta a una alta persistencia en la volatilidad de la inflación. El valor de ω es 5,5500e-02, lo que indica una componente constante de volatilidad en el modelo Garch. El coeficiente β es 0,9150, cifra que muestra una alta persistencia en la volatilidad. Sin embargo, el log-likelihood es negativo (-49,8407), y tanto el AIC como el BIC son positivos, lo que sugiere un ajuste óptimo del modelo en comparación con los otros.

$$(4) \hat{\sigma}_{t-\text{Inf}}^2 = 5,5500 \times 10^{-2} + 9,1500 \hat{\varepsilon}_{t-1}^2$$

La varianza estimada para la serie temporal de PIB (ecuación 5) muestra que el coeficiente α es 0,9338, lo que indica un impacto significativo del error al cuadrado en el periodo anterior en la varianza condicional, así como una alta persistencia en la volatilidad del PIB. El valor de ω es 1,0436e-05, lo que apunta a una componente constante de volatilidad en el modelo Garch. El coeficiente β es 0,9338, lo cual indica una alta persistencia en la volatilidad. El log-likelihood es positivo (106,787), y tanto el AIC como el BIC son negativos; esto sugiere un buen ajuste del modelo.

$$(5) \hat{\sigma}_{t-\text{PIB}}^2 = 1,0436 \times 10^{-5} + 9,3380 \hat{\varepsilon}_{t-1}^2$$

Por último, para la serie temporal Vol_Billon, el coeficiente α es 1.000, lo que sugiere que el impacto del error al cuadrado en el periodo anterior en la varianza condicional es total. El valor de ω es 3.1000e-02, lo que

indica una componente constante de volatilidad en el modelo Garch. Similar a AMZN, el modelo no incluye un componente ARMA. Sin embargo, el log-likelihood es negativo (-24.6282), y tanto el AIC como el BIC son positivos, lo que sugiere un ajuste óptimo del modelo en comparación con los otros.

$$(6) \hat{\sigma}_{t-\text{VolBill}}^2 = 3,1000 \times 10^{-2} + 1,000 \hat{\varepsilon}_{t-1}^2$$

Los resultados de la estimación de la volatilidad a través de los modelos Garch, permiten detectar periodos de persistencia de la volatilidad en el precio de las acciones de analizadas, y estiman de manera robusta la dinámica de la varianza en episodios altamente influenciados por los fundamentales de la macroeconomía y por el evento exógeno inducido por la aparición del covid 19.

A renglón seguido se comparan ARCH y Garch a partir de los criterios estadísticos de Akaike y bayesiano de Schwartz (tabla 4).

Los residuos del modelo Garch (1,1) (figura 2) exhiben un patrón de *volatility clustering*⁹ documentado por Bollerslev (1986) y Engle (1982): periodos de baja variabilidad se alternan con episodios de alta dispersión asociados a choques sistémicos identificables. El pico

9- El agrupamiento de volatilidad (*volatility clustering*) es la tendencia de los mercados financieros a presentar periodos de alta volatilidad seguidos de otros periodos de alta volatilidad, y periodos de calma seguidos de calma. En términos estadísticos, implica que la varianza de los rendimientos no es constante, sino que depende de su historia reciente, lo que viola el supuesto de homocedasticidad de los modelos clásicos.

de 2016 coincide con el ciclo electoral estadounidense y la normalización de tasas de la Reserva Federal, el de 2018 refleja la guerra comercial Estados Unidos-China y el de 2020 corresponde al choque de la pandemia de covid-19, evento que Alqahtani et al. (2023) identificaron como el mayor perturbador de la volatilidad bursátil del S&P 500 en el periodo reciente, con efectos diferenciados por sector y especialmente pronunciados en empresas tecnológicas de alto volumen de operaciones; por último, el repunte de 2024 es consistente con el ciclo de ajuste monetario de la Fed iniciado en 2022. Toma (2023), en un estudio análogo sobre acciones del sector TI con modelos Arima-Garch, encontró que estos picos no comprometen la validez del modelo siempre que los residuos no exhiban autocorrelación serial sistemática, condición que el presente modelo satisface, lo que confirma la adecuación de la especificación Garch (1,1) para captar la dinámica de volatilidad condicional de AMZN en el periodo 2015-2024.

Tabla 4
Comparación ARCH vs. Garch (1,1) para la serie AMZN

Criterio	ARCH	Garch (1,1)
AIC	-96,47	-94,47 ✓
BIC	-91,80	-88,25 ✓
Significancia α_1	No significativo	$p = 0,012$ ✓
Autocorrelación residual	Presente	Ausente ✓

Fuente: Elaboración propia, a partir de la estimación de un modelo ARCH y Garch.

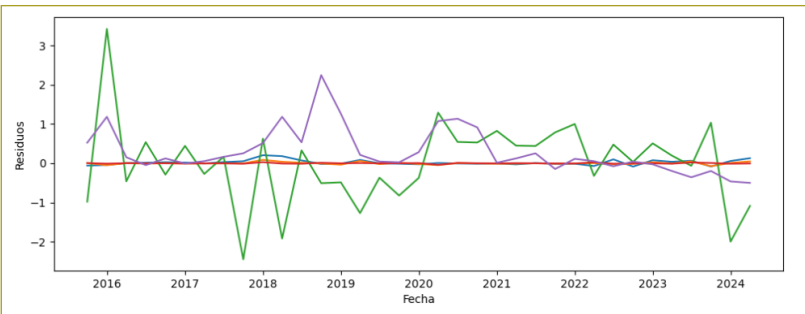


Figura 2. Residuos del modelo Garch (1,1) - AMZN

Fuente: Elaboración propia, a partir de la estimación de un modelo ARCH y Garch.

En el correlograma siguiente (figura 2) se muestra que los residuos del modelo Garch (1,1) presentan autocorrelaciones cercanas a cero en todos los rezagos, con excepción del rezago 0 —que, por construcción estadística, siempre toma el valor de 1—. Este patrón simétrico respecto al eje vertical confirma la ausencia de dependencia serial sistemática en los residuos, lo que constituye una condición necesaria para validar la adecuación de la especificación del modelo.

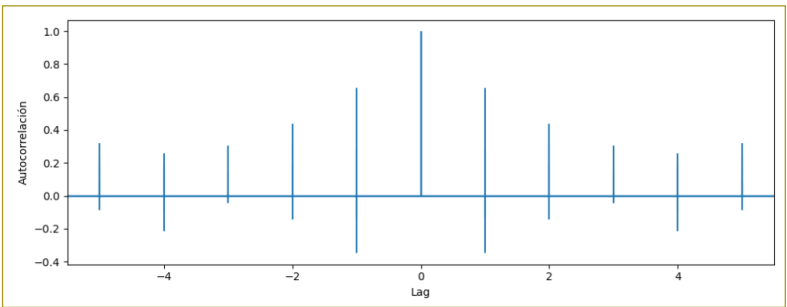
Box y Jenkins (1976) establecieron que la no significancia de las autocorrelaciones residuales es el criterio diagnóstico fundamental para evaluar si un modelo de series temporales ha captado correctamente la estructura de dependencia de los datos. Para el caso específico de activos tecnológicos de alta capitalización, Toma (2023) señala que la persistencia de picos aislados en los rezagos intermedios, como los observados en los rezagos ± 1 y ± 2 (figura 3), no compromete la validez del modelo cuando no superan las bandas de confianza al 95 %, siendo atribuibles a ruido muestral propio de series financieras trimestrales con número reducido de observaciones.

Análisis de riesgo de las proyecciones del modelo VAR

En razón de las proyecciones proporcionadas por el modelo VAR final, después de someterlas a un riguroso proceso de evaluación de su calidad, calibración

Figura 3. Autocorrelación del modelo Garch (1,1) - AMZN

Fuente: Elaboración propia, a partir de la estimación de un modelo ARCH y Garch.



y relevancia, mediante diversas pruebas estadísticas y econométricas para validar su complejidad y ajuste, surge la necesidad de profundizar en el análisis del comportamiento de estos precios proyectados. Para esto se recurre al cálculo del valor en riesgo (VaR), una métrica que, como se ha destacado a lo largo de este trabajo, es fundamental en la gestión de riesgos financieros. El *software* Risk Simulator facilita el cálculo del VaR al permitir la simulación de múltiples escenarios y la evaluación de la distribución de rendimientos de los activos financieros, lo que permite identificar y cuantificar los riesgos potenciales en el portafolio de inversión; esto ayuda a los inversionistas y gestores de riesgos a tomar decisiones informadas, así como a implementar estrategias de mitigación adecuadas.

Al analizar el comportamiento de los precios proyectados en términos de VaR con el apoyo del *software* Risk Simulator, se obtiene una visión más completa y precisa del riesgo inherente a las proyecciones del modelo VAR, lo cual proporciona una base sólida para la toma de decisiones financieras y la gestión eficaz del riesgo en un entorno dinámico y volátil del mercado. Este trabajo en conjunto de ambas herramientas es el objetivo principal del presente escrito.

La aplicación del análisis de riesgo sobre los precios proyectados por el VAR —mediante simulación de Monte Carlo con Risk Simulator— arroja un VaR de $-0,3993$, con un nivel de confianza del 95 % para el horizonte trimestral proyectado. La mejor distribución ajustada a las rentabilidades proyectadas resultó ser la distribución Gumbel máxima (criterio Kolmogorov-Smirnov), indicando que la distribución de pérdidas potenciales tiene colas asimétricas sesgadas a la derecha: los escenarios de pérdida extrema, aunque poco probables, no son despreciables.

Este resultado se debe interpretar tomando en cuenta que el número de datos proyectados es limitado (horizonte trimestral), lo que restringe la precisión de la estimación. Sin embargo, la magnitud del VaR prospectivo ($-0,3993$) es consistente con el perfil de riesgo moderado que muestran las metodologías históricas.

Este resultado, respaldado por un análisis riguroso y una evaluación detallada de la distribución de rendimientos, brinda una guía valiosa para la toma de decisiones financieras informadas. A pesar de su limitado suministro de precios proyectados, este VaR es capaz de dar una perspectiva importante en el análisis de riesgo,

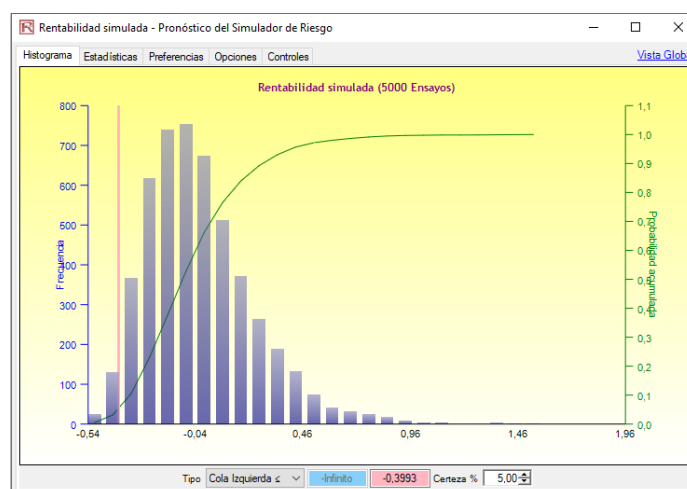


Figura 4. Distribución del VaR sobre proyecciones del VAR (IC 95 %)

Fuente: Elaboración propia mediante el *software* Risk Simulator.

dada una inversión en las acciones de Amazon en los cuatro años siguientes después del periodo de análisis utilizado para la estimación de modelo VAR.

CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un enfoque integrado de modelado financiero que combina un VAR multivariado de orden 6, un modelo Garch (1,1) y el cálculo del VaR mediante cuatro metodologías, aplicado al precio de las acciones de Amazon durante el periodo 2019-2023. Los principales hallazgos son los siguientes.

En primer término, la convergencia observada entre las metodologías de VaR histórico ($-3,16$ % a $-3,79$ %) valida la consistencia interna del modelo y confirma que la máxima pérdida esperada diaria con un 95 % de confianza se sitúa en torno al $-3,79$ % según Monte Carlo, resultado coherente con la alta volatilidad que caracterizó a AMZN durante el periodo de estudio. Estas cifras respaldan la hipótesis planteada sobre la consistencia entre metodologías.

En segundo lugar, el modelo VAR (6) demostró que la dinámica del precio de AMZN está significativamente influenciada por las condiciones macroeconómicas con rezagos de hasta seis trimestres. La inclusión del PIB, la inflación y el S&P 500 mejoran la capacidad del modelo para captar los ciclos de ajuste que experimenta una acción de alto crecimiento frente a cambios en el entorno económico, resultado que no se puede obtener con modelos univariados.

En tercera instancia, la adopción del Garch (1,1), justificada por criterios de información y significancia estadística, confirma la presencia de persistencia de volatilidad en AMZN ($\alpha_1 = 1,000$). Este resultado tiene implicaciones directas para la gestión del riesgo: los *shocks* de volatilidad tienden a mantenerse en el tiempo, lo que exige estrategias de cobertura dinámicas.

La aplicación del análisis de valoración en riesgo (VaR) a partir de las proyecciones del modelo de vectores autorregresivos (VAR)¹⁰ introduce una dimensión metodológica novedosa que transforma al VaR de una métrica retrospectiva en un indicador prospectivo de riesgo. Desde una perspectiva práctica, la distribución Gumbel máxima ajustada a las proyecciones sugiere que los escenarios de pérdida extrema tienen mayor probabilidad que la asignada por una distribución normal, reforzando la necesidad de complementar el VaR con métricas de riesgo en las colas (Expected Shortfall o CVaR) en periodos de alta incertidumbre macroeconómica.

Como limitación principal, el modelo depende de la calidad de las proyecciones macroeconómicas generadas por Arima: errores en la proyección del PIB o la inflación se propagan al VAR. Para investigaciones futuras se sugiere incorporar variables adicionales (tasas de interés de la Fed, rendimientos del bono del Tesoro a diez años), explorar especificaciones Garch-M que retroalimenten la volatilidad estimada como variable en la ecuación de media del VAR y extender el análisis a una cartera diversificada de acciones tecnológicas del S&P 500.

Agradecimientos

Si el trabajo proviene de un proyecto financiado con fondos públicos, o representa a una empresa o entidad, es recomendable mencionarlo en esta sección. También se pueden incluir agradecimientos a personas o entidades que hayan apoyado el desarrollo o mejora de la investigación, como los evaluadores. Esta sección solo debe completarse en la versión final, después de que el manuscrito haya sido aceptado para publicación.

10. El modelo de valoración en riesgo arroja un VaR prospectivo de -0,3993, con un intervalo de confianza del 95 % (IC 95 %). Esto indica que, con un 95 % de certeza, la pérdida máxima esperada no será superior al 39,93 % del valor de la cartera en el horizonte de tiempo proyectado.

Autoría

La profesora María Constanza Torres sugirió las ideas y la estructura del artículo, y asesoró el tema relacionado con portafolio de inversiones. El profesor Álvaro Hernando Chaves asesoró la implementación de las metodologías econométricas relacionadas con los modelos univariados y multivariados de series de tiempo, así como los modelos de volatilidad. El economista Alberto Chaparro tuvo a su cargo el desarrollo de la programación y el diseño de códigos en el programa Python para la estimación de los modelos, y colaboró en la búsqueda y compilación de la información a partir de diversas fuentes.

REFERENCIAS

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Alarcón Valenzuela, J., Galeano Murcia, J., y Villamil Moreno, A. (2021). *Contratos de futuro de agua (NH₂O) y cálculo de su riesgo financiero entre el 2019 y 2021*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Alqahtani, A., Bouri, E., y Vo, X. V. (2023). Stock market forecasting accuracy of asymmetric Garch models during the covid-19 pandemic. *Finance Research Letters*, 51, 103520. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.103520>
- Bollerslev, T. (1986). Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. *Journal of Econometrics*, 31(3), 307-327. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(86\)90063-1](https://doi.org/10.1016/0304-4076(86)90063-1)
- Box, G. E. P., y Jenkins, G. M. (1976). *Time series analysis: forecasting and control* (2ª ed.). Holden-Day.
- Caicedo Ocampo, H., y Castañeda Vargas, A. (2022). *Ranking del riesgo de mercado de los bancos que cotizan en la Bolsa de Valores de Colombia (BVC) utilizando metodologías VaR para el periodo enero 2020-marzo 2022*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2102>
- Campbell, J. Y., y Shiller, R. J. (1988). The dividend-price ratio and expectations of future dividends and discount factors. *Review of Financial Studies*, 1(3), 195-228. <https://doi.org/10.1093/rfs/1.3.195>
- Engle, R. F. (1982). Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of United Kingdom inflation. *Econometrica*, 50(4), 987-1007. <https://doi.org/10.2307/1912773>
- Engle, R. F. (2001). Garch 101: the use of ARCH/Garch models in applied econometrics. *Journal of Economic Perspectives*, 15(4), 157-168. <https://doi.org/10.1257/jep.15.4.157>
- Engle, R. F., Hendry, D. F., y Richard, J. F. (1983). Exogeneity. *Econometrica*, 51(2), 277-304. <https://doi.org/10.2307/1911990>
- Fama, E. F. (1990). Stock returns, expected returns, and real activity. *Journal of Finance*, 45(4), 1089-1108. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1990.tb02428.x>
- Investing.com (s. f.). Gráfico de Amazon.com (AMZN) en tiempo real. <https://es.investing.com/equities/amazon-com-inc-chart>
- Jorion, P. (2007). *Value at Risk: the new benchmark for managing financial risk* (3ª ed.). McGraw-Hill.

- Lütkepohl, H. (2005). *New introduction to multiple time series analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-27752-1>
- Mandelbrot, B. (1963). The variation of certain speculative prices. *The Journal of Business*, 36(4), 394-419. <https://doi.org/10.1086/294632>
- MarketScreener (s. f.). Composición S&P 500. <https://es.marketscreener.com/indice/SP-500-US78378X1072/componentes/>
- Ramírez, E., y Ramírez, P. (2007). Metodología para el cálculo del valor en riesgo mediante simulación histórica. *Revista de Economía Financiera*, 12(1), 45-68.
- Rodó, P. (2022, 24 de noviembre). Modelo VAR. *Economipedia*. <https://economipedia.com/definiciones/modelo-var.html>
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, 6(2), 461-464. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344136>
- Schwert, G. W. (1990). Stock returns and real activity: a century of evidence. *Journal of Finance*, 45(4), 1237-1257. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1990.tb02434.x>
- Sims, C. A. (1980). Macroeconomics and reality. *Econometrica*, 48(1), 1-48. <https://doi.org/10.2307/1912017>
- Stock, J. H., y Watson, M. W. (2001). Vector autoregressions. *Journal of Economic Perspectives*, 15(4), 101-115. <https://doi.org/10.1257/jep.15.4.101>
- Toma, L. R. (2023). Exploring the effectiveness of Arima and Garch models in stock price forecasting: an application in the IT industry. *Informatica Economica*, 27(3), 61-72.

Factores de cambio tecnológico claves para el futuro de las empresas manufactureras

Key Technological Factors for the Future of Manufacturing Companies

ADRIANA MARCELA ZAMBRANO-SÁNCHEZ¹ - DIANA CAROLINA CABRA-BALLESTEROS² -
LAURA CAMILA APONTE MEDINA³

1. Magíster en pensamiento estratégico y prospectiva. Administradora de Empresas. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

adriana.zambrano@escuelaing.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9447-1476>.

2. Magíster en dirección. Administración de negocios internacionales. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

diana.cabra@escuelaing.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8709-7145>.

3. Ingeniera Industrial. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

laura.aponte-m@mail.escuelaing.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5169-4085>.

Recibido: 25/09/2025 Aceptado: 30/10/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En el presente estudio se identifican los factores de cambio tecnológico que incidirán en el desarrollo de empresas manufactureras de base tecnológica en Bogotá durante la próxima década. La investigación se desarrolló mediante un enfoque cualitativo de carácter prospectivo, con una selección de catorce expertos vinculados a las industrias priorizadas, entrevistas individuales y grupales, análisis de contenido y revisión de bibliografía especializada. Como resultado, se identificaron diez factores tecnológicos: almacenamiento en la nube, automatización, *blockchain*, realidad mixta, ciudades inteligentes, ciencia de datos, fuentes energéticas eficientes, diversificación de la matriz energética, inteligencia artificial y singularidad tecnológica.

A lo largo del artículo se aporta una base de referencia para comprender las transformaciones tecnológicas del entorno manufacturero y orientar la toma de decisiones empresariales en innovación, adaptación y competitividad.

Palabras claves: factores de cambio tecnológico, empresas manufactureras de base tecnológica, automatización, inteligencia artificial, transición energética.

Abstract

This study identifies the technological change factors that will influence the development of technology-based manufacturing firms in Bogotá over the next decade. The research was conducted through a qualitative, prospective approach, involving the selection of fourteen experts linked to the prioritized industries, individual and group interviews, content analysis, and a review of specialized literature. As a result, ten technological factors were identified: cloud storage, automation, *blockchain*, mixed reality, smart cities, data science, efficient energy sources, diversification of the energy matrix, artificial intelligence, and technological singularity.

The article provides a reference framework for understanding technological transformations in the manufacturing environment and for guiding managerial decision-making in innovation, adaptation, and competitiveness.

Keywords: technological change factors, technology-based manufacturing firms, automation, artificial intelligence, energy transition.

INTRODUCCIÓN

Las empresas de base tecnológica (EBT) han adquirido una creciente relevancia en la economía contemporánea debido a su capacidad para incorporar conocimiento, innovación y tecnologías avanzadas en la generación de valor (Tassey, 2013; Bouncken et al., 2021). En sectores manufactureros, esta dinámica se expresa en la necesidad de anticipar cambios tecnológicos que transforman los procesos productivos, los modelos de negocio y las condiciones de competitividad. En este contexto, las empresas no solo deben adoptar nuevas tecnologías, sino también desarrollar capacidades para interpretar de manera oportuna las señales de cambio del entorno y responder estratégicamente a estas.

En Bogotá, esta exigencia resulta especialmente relevante para las empresas manufactureras de base tecnológica vinculadas a la fabricación de aparatos, máquinas y equipos eléctricos, dado que operan en un entorno marcado por la digitalización, la automatización, la transición energética y la convergencia tecnológica. Aunque en la bibliografía especializada se ha documentado ampliamente el impacto de la industria 4.0 y de la transformación digital en la competitividad empresarial, persiste la necesidad de reconocer, en contextos sectoriales específicos, cuáles son los factores de cambio tecnológico con mayor incidencia a mediano plazo y cómo estos pueden orientar la toma de decisiones empresariales. Esta necesidad justifica el desarrollo de estudios prospectivos que permitan identificar señales relevantes de transformación y traducirlas en insumos analíticos para la gestión empresarial.

Para efectos de la investigación, se entiende por factor de cambio aquellas fuerzas que dan forma a cambios confusos y fortuitos que se presentan en el futuro. Como lo explican Velásquez y Sepúlveda (2015), son “todas aquellas fuerzas identificables que potencian o promueven los cambios en el entorno que, a su vez, determinan los grados de incertidumbre o el número de oportunidades que conforman el futuro”. En cuanto a las tendencias, se definen como “una inclinación o dirección de cambio impulsada por fuerzas externas que apunta a un estado probable en el futuro, pero cuya materialización es incierta” (Campos, 2018). Por lo tanto, al investigar sobre las tendencias tecnológicas, se hace referencia a los cambios futuros relevantes de “nuevos procedimientos, metodologías, medios o similares aplicados a la producción, que permiten incrementar la

productividad, la rentabilidad de una organización o la cantidad de sus bienes” (Martínez-Arias, 2016, p. 34). En este orden de ideas, para efectos del estudio realizado los factores de cambio son fuerzas que agrupan una o más tendencias tecnológicas.

En este contexto, si bien en la bibliografía se han abordado ampliamente los procesos de transformación asociados a la industria 4.0 y la digitalización, persiste un vacío en la identificación sistemática de factores de cambio tecnológico en sectores manufactureros específicos dentro de contextos urbanos latinoamericanos, particularmente desde enfoques prospectivos basados en conocimiento experto, limitación que restringe la capacidad de las empresas para anticipar escenarios de transformación y orientar estratégicamente sus decisiones de innovación y adaptación.

Así las cosas, el objetivo del presente artículo es identificar los factores de cambio tecnológico que incidirán en el desarrollo de las empresas manufactureras de base tecnológica en Bogotá durante la próxima década, con énfasis en la industria de fabricación de aparatos, máquinas y equipos eléctricos, a partir de un enfoque prospectivo sustentado en consulta a expertos y análisis de contenido. De esta manera, en el estudio se busca aportar un marco analítico que permita comprender las dinámicas emergentes del entorno tecnológico y contribuir a la toma de decisiones empresariales en escenarios de alta incertidumbre.

METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló mediante un enfoque cualitativo de carácter prospectivo, a partir de la adaptación de la metodología de prospectiva laboral cualitativa propuesta por el Ministerio del Trabajo de Colombia, la cual, a su vez, toma como referencia el modelo Senai de prospección (Riomaña, 2017). Este enfoque se empleó por su pertinencia para anticipar cambios tecnológicos sectoriales en horizontes a mediano plazo y para reducir la incertidumbre mediante consulta a expertos. En el marco del presente artículo, la aplicación metodológica se concentró exclusivamente en las empresas manufactureras de base tecnológica en Bogotá, con énfasis en las divisiones 27 (fabricación de aparatos y equipo eléctrico) y 28 (fabricación de maquinaria y equipo n.c.p.), conforme a la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU).

La metodología se organizó en tres fases. La primera correspondió a la delimitación del sector de estudio y a la identificación preliminar de cambios relevantes en el entorno tecnológico. Para esto, se tomó la rama manufacturera, específicamente las divisiones 27 y 28, seleccionadas con anterioridad como actividades económicas de interés dentro de las empresas de base tecnológica en Bogotá. Esta focalización permitió acotar el análisis a un subsector manufacturero con intensidad tecnológica y potencial de transformación en el horizonte prospectivo considerado.

La segunda fase consistió en la consulta a expertos, siguiendo una lógica de análisis prospectivo apoyada en la técnica Delphi (Wilson et al., 2017). En el presente estudio, dicha técnica se empleó en una versión adaptada, orientada a la consulta estructurada de expertos mediante entrevistas individuales y grupales, sin la aplicación de rondas iterativas sucesivas propias del método clásico. Esta adaptación permitió recoger juicios informados sobre tendencias tecnológicas emergentes, manteniendo la lógica de consenso y validación cualitativa, característica de los enfoques prospectivos basados en expertos.

Para el componente manufacturero del estudio se consideraron catorce expertos, diez de ellos pertenecientes directamente al sector manufacturero y los cuatro restantes especializados en temas transversales en tecnología, cuya trayectoria en innovación, tecnologías convergentes y emprendimiento permitió complementar la visión sectorial. Los expertos se seleccionaron con base en tres criterios:

- Conocimiento y trayectoria en las divisiones manufactureras priorizadas.
- Vinculación con agremiaciones, entidades gubernamentales, centros de investigación o instituciones de segundo orden relacionadas con la industria.
- Desempeño en empresas que operan en las actividades manufactureras objeto de estudio.

El perfil de los participantes permitió integrar perspectivas provenientes de empresa, academia, gobierno y actores transversales del ecosistema de innovación. El número de expertos se definió atendiendo a criterios de saturación teórica, en los cuales la incorporación de nuevos participantes no generaba información sustancialmente distinta, lo que permitió garantizar la suficiencia y pertinencia del corpus de análisis.

La tercera fase correspondió al procesamiento y análisis de la información. Las respuestas obtenidas en las entrevistas se sometieron a análisis de contenido, por medio de un procedimiento de depuración, comparación y agrupación de términos iguales o semánticamente similares. Este proceso permitió transformar la información cualitativa en unidades analíticas comparables y estimar frecuencias de mención de las tendencias identificadas (Okoli, 2019). Los resultados se sometieron a un proceso de triangulación entre la información obtenida de los expertos y la revisión de bibliografía especializada, con el propósito de fortalecer la validez del análisis, lo cual permitió contrastar las tendencias identificadas con evidencia académica y técnica. Así mismo, se verificó la coherencia interna de las categorías construidas mediante revisión iterativa del proceso de codificación y agrupación temática.

Posteriormente, se hizo un análisis taxonómico para organizar dichas tendencias en categorías de nivel superior, denominadas factores de cambio (Onwuegbuzie et al., 2012). En este estudio, una tendencia tecnológica se entiende como un cambio específico asociado con tecnologías, procedimientos o desarrollos con potencial de incidencia sectorial, mientras que un factor de cambio corresponde a una categoría integradora que agrupa una o varias tendencias afines por su relación semántica y estratégica; en consecuencia, el paso de tendencias a factores de cambio se realizó mediante agrupación temática, denominación conceptual y validación de su pertinencia para el contexto manufacturero. La agrupación de tendencias en factores de cambio se hizo considerando criterios de afinidad temática, complementariedad funcional y relevancia estratégica para el sector manufacturero, lo que permitió estructurar categorías analíticas coherentes y aplicables al contexto de estudio.

Como resultado de este procedimiento se construyó la matriz de identificación de factores de cambio, en la cual se clasificaron las tendencias tecnológicas reconocidas por los expertos y se establecieron las agrupaciones que dieron lugar a los factores de cambio analizados en el artículo. Finalmente, se revisó la bibliografía especializada en bases de datos académicas para complementar la definición de cada factor y documentar ejemplos de aplicación en contextos manufactureros reales. En conjunto, el enfoque metodológico adoptado permitió integrar conocimiento experto, análisis cualitativo y

soporte bibliográfico, configurando un marco analítico robusto para la identificación de factores de cambio tecnológico en contextos de incertidumbre y transformación sectorial.

RESULTADOS

En numerosos estudios se han analizado los efectos positivos de la industria 4.0 y la digitalización en las empresas con desarrollo centrado en la tecnología (Bee-Lan Lok et al., 2021; Schwab, 2017; Zabidin et al., 2019). De acuerdo con Tropschuh et al. (2021), la industria 4.0 está orientada a hacer frente a la complejidad y volatilidad del entorno de producción impulsada por la tecnología. La aplicación de la metodología permitió identificar 10 factores de cambio tecnológico y 26 tendencias asociadas con incidencia probable en el desarrollo de las empresas manufactureras durante la próxima década. Los resultados evidencian que los factores de cambio tecnológico identificados no tienen una distribución homogénea en materia de complejidad, alcance e impacto esperado. En particular, se observa una mayor concentración de tendencias en factores asociados con la automatización, la ciencia de los datos y la transición energética, lo que sugiere que la transformación del sector manufacturero estará impulsada por la convergencia entre digitalización, analítica avanzada y sostenibilidad energética.

Igualmente, algunos factores presentan un carácter habilitador (como el almacenamiento en la nube), mientras que otros tienen un impacto más estructural en la configuración del sistema productivo (como la inteligencia artificial y la diversificación de la matriz energética), tal como se presenta a renglón seguido (tabla 1).

La distribución de las tendencias muestra que el factor de automatización concentra el mayor número de desarrollos tecnológicos, lo que evidencia su papel central en la transformación operativa de la manufactura. Por su parte, factores como inteligencia artificial y ciencia de los datos, aunque con menor número de tendencias, presentan un alto potencial de impacto estratégico debido a su capacidad de incidir en la toma de decisiones y en la generación de valor a partir de la información; en contraste, factores como *blockchain* y realidad mixta presentan un menor nivel de desarrollo relativo, lo que sugiere un estado más incipiente en su adopción dentro del sector analizado.

Tabla 1
Factores de cambio y tendencias tecnológicas

Factor de cambio		Tendencias tecnológicas
1	Almacenamiento en la nube	Computación en la nube
2	Automatización	Internet industrial de las cosas
		Contadores electrónicos de consumo
		Optimización de los equipos tecnológicos
		Tecnologías ERP, RPA y BPM
		Impresión 3D
3	<i>Blockchain</i>	Criptoactivos
4	Realidad mixta	Realidad virtual y aumentada
5	Ciudades inteligentes	Redes inteligentes
6	Ciencia de los datos	Ciberseguridad
		<i>Big data</i>
		Gobernanza de los datos
		Extracción automatizada de datos web
7	Fuentes energéticas eficientes	Gestión eficiente de infraestructura y energía
		Eficiencia energética
		Fuentes para confiabilidad y estabilidad a los sistemas solares y eólicos
		Compatibilidad electromagnética
8	Diversificación de la matriz energética	Transición energética en zonas no interconectadas
		Almacenamiento de energías alternativas
		Fuentes alternativas más estables como geotermia y biomasa
		Hidrógeno verde y azul
		Movilidad eléctrica
9	Inteligencia artificial	Aprendizaje automático y aprendizaje profundo
		Inteligencia artificial
10	Singularidad tecnológica	Internet de las cosas
		Tecnologías convergentes NBIC (nano, bio, info, cogno)

Fuente: Elaboración propia, con base en los resultados del estudio y en la síntesis de manufactura.

A continuación, se presenta el análisis de los factores de cambio:

Almacenamiento en la nube

Es un modelo computacional que reúne tecnologías web para facilitar el empleo de recursos y ofrecerlos

en la modalidad de pago por demanda en función de las necesidades de los usuarios finales (Vallecillos, 2014). Dentro de este factor de cambio la tendencia es computación en la nube, cuya principal característica es la transformación de los métodos tradicionales de adquisición y empleo de recursos de tecnologías de la información (Murazzo et al., 2012) que “permite el acceso bajo demanda a través de la red a un conjunto compartido de recursos de computación configurables (redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios) que se pueden aprovisionar rápidamente con el mínimo esfuerzo de interacción del proveedor del servicio” (Mell y Grance, 2011).

Este factor agrupa tecnologías orientadas a la disponibilidad, escalabilidad y gestión remota de recursos informáticos. Su relevancia para la manufactura radica en que facilita la integración de información, la interoperabilidad entre áreas y el acceso flexible a infraestructura digital, elementos cada vez más necesarios en entornos productivos conectados; en consecuencia, la computación en la nube se configura como un habilitador transversal para otras transformaciones tecnológicas del sector.

Automatización

La automatización transformó la manufactura con la implementación de robots y sistemas automatizados para aumentar la eficiencia y reducir costos (Pérez, 2022). Este factor involucra cinco tendencias: internet industrial de las cosas, contadores electrónicos de consumo, optimización de los equipos tecnológicos, implementación de tecnologías ERP, RPA y BPM, e impresión 3D.

El primero (IIoT) se refiere a la integración de computación, redes y objetos físicos en la industria. Dispositivos conectados en red detectan, monitorean y controlan el mundo físico, impulsando el progreso en los negocios y la fabricación (Valencia y Portilla, 2021).

Otra de las tendencias son los *contadores electrónicos de consumo*. La energía eléctrica es esencial para la economía y se requieren medidores digitales con prestaciones exhaustivas para la instrumentación y gestión de carga. Además, estos dispositivos no solamente registran el consumo, sino que notifican fallas, monitorean en tiempo real la calidad del servicio y ofrecen otras aplicaciones (Aguayo y Navia, 2018; Chalén, 2016; Gómez, 2020).

La siguiente tendencia dentro de este factor de cambio involucra la implementación de tres tecnologías: *Enterprise Resource Planning* (ERP) se refiere a aplicaciones informáticas estándar y adaptables que integran soluciones de negocios para procesos y funciones administrativas (Arias, 2015). *Robotic Process Automation* (RPA) se refiere a la automatización de procesos transaccionales basada en reglas específicas, utilizando *software* en lugar de robots físicos (Biga, 2020). Y *Business Process Management* (BPM) es un enfoque más amplio que busca racionalizar y mejorar la eficiencia de los procesos empresariales de extremo a extremo. RPA puede complementar el enfoque de BPM (Iacono et al., 2018).

La *última tendencia* en este factor de cambio es la *impresión 3D*, crear objetos tridimensionales mediante la adición de material. A partir de un archivo digital, se aplican capas sucesivas de material para crear objetos tangibles (Jorquera, 2016). Algunas ventajas incluyen la capacidad de fabricar objetos complejos sin costo adicional, la posibilidad de crear variedad en una sola impresión, la reducción del ensamblaje y la fabricación sin necesidad de expertos. Adicionalmente, es compacta y genera menos desperdicios, aumentando la eficiencia (Campillo, 2017).

La automatización constituye el factor de cambio con mayor amplitud de tendencias asociadas, lo que evidencia su centralidad en la transformación manufacturera. Incluye la incorporación de sistemas conectados, digitalización de medición y control, optimización de equipos, integración de soluciones de gestión empresarial y fabricación aditiva. En conjunto, estas tendencias apuntan a una manufactura más eficiente, trazable, flexible y orientada a datos, con efectos directos sobre productividad, calidad y capacidad de respuesta operativa.

Blockchain

Es una base de datos compartida por muchos usuarios en un entorno *peer-to-peer*, que almacena información de manera inmutable y ordenada (Retamal et al., 2017), y brinda confianza en transacciones y funciones mediante criptografía y ciberseguridad avanzada (Zhang, R. et al., 2019). El sistema de validación de bloques es inmutable, lo que garantiza que las transacciones antiguas y nuevas se mantengan para siempre (Vemuri, 2018).

La tendencia asociada son *criptoactivos*, criptomonedas o activos digitales. Son una forma de moneda digital

que utiliza la tecnología criptográfica para garantizar la seguridad de las transacciones y controlar la creación de nuevas unidades (Cano, 2022).

Este factor remite a tecnologías de registro distribuido, aplicables a trazabilidad, seguridad de transacciones e intercambio confiable de información. Su relevancia analítica para la manufactura comprende: soporte a ecosistemas de transacción, certificación y validación en cadenas de valor cada vez más digitalizadas.

Realidad mixta

Se la conoce como la combinación de realidad virtual y realidad aumentada, que permite interactuar con objetos virtuales en el mundo real y generar diversas aplicaciones y proyectos para cubrir necesidades (Sánchez y Ramírez, 2020). Estas tecnologías impactan la ciencia y tecnología, introduciendo nuevas técnicas y enfoques en la producción y validación de conocimientos (Amaro-Rosales y Robles-Belmont, 2020).

Las tendencias que involucra son la *realidad virtual* y la *realidad aumentada*. Esta última es una tecnología que combina contenido virtual con el mundo físico, proporcionando información útil, como indicaciones en supermercados o manuales de usuario, por medio de soportes digitales. Mientras tanto, la *realidad virtual* implica la reproducción de contenido mediante dispositivos digitales, como gafas de realidad virtual, creando experiencias inmersivas, interactivas e imaginativas para los usuarios (Bockholt, 2017; Otegui, 2017).

La realidad mixta agrupa desarrollos de realidad virtual y realidad aumentada con potencial de aplicación en entrenamiento, mantenimiento, visualización de procesos, asistencia remota y simulación. En el ámbito manufacturero, este factor adquiere importancia por su capacidad para mejorar la interacción entre operarios, sistemas y entornos productivos complejos, así como para fortalecer procesos de formación y soporte técnico.

Ciudades inteligentes

Las investigaciones sobre el desarrollo de ciudades destacan factores como la economía basada en el conocimiento, la tecnología digital, el enfoque ecológico y las ciudades inteligentes (Fernández, 2017). Estas se caracterizan por el uso intensivo de tecnologías para mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y lograr

un desarrollo sostenible mediante la colaboración y la innovación (Góngora, 2015).

La tendencia identificada fueron las *redes inteligentes*, una interconexión de recursos energéticos con estrategias modernas para generar, transmitir, distribuir y consumir electricidad eficientemente. Esto se consigue por medio de la integración de tecnologías avanzadas de sensores, comunicación y control (Giral et al., 2017). La implementación de redes inteligentes ofrece beneficios como mayor confiabilidad, eficiencia energética, seguridad y beneficios financieros (Tello-Maita y Marulanda-Guerra, 2017).

Este factor se concreta en la tendencia de redes inteligentes, especialmente relevante para empresas manufactureras vinculadas con sectores eléctricos y energéticos. Su importancia radica en la articulación entre infraestructura, digitalización y eficiencia en la gestión de flujos energéticos. En ese orden de ideas, conecta la transformación industrial con cambios más amplios en el entorno urbano y en los sistemas de provisión de energía.

Ciencia de datos

Este campo de estudio es interdisciplinario y abarca estadística, inteligencia artificial y minería de datos, entre otras (Malberti et al., 2021). Se requiere un pensamiento analítico en datos y una comprensión holística para extraer información significativa (Provost y Fawcett, 2013). Las actividades de un científico de datos comprenden la exploración y preparación, representación y transformación, computación, visualización y presentación, y modelado de datos, funciones para desarrollar conclusiones y modelos predictivos en diversos campos (Ramos, 2020). Este factor involucra cuatro tendencias: ciberseguridad, *big data*, gobernanza de los datos y extracción automatizada de datos web.

La *ciberseguridad* tiene que ver con medidas tomadas y elementos destinados a proteger la seguridad informática (Ovalle, 2020). La protección de la información es esencial para detener los cibercrímenes que ocurren en entornos virtuales y deslocalizados, lo que plantea desafíos en su investigación y persecución (Posada, 2017).

La siguiente tendencia se refiere al *big data*, grandes volúmenes de datos estructurados y no estructurados que las organizaciones pueden analizar para obtener ideas y tomar decisiones estratégicas (Ortiz, 2021).

Los principios para el diseño de sistemas *big data* incluyen buenas arquitecturas, variedad de métodos analíticos y procesamiento y almacenamiento distribuidos (Hernández-Leal et al., 2017). Las tecnologías asociadas al *big data* están evolucionando y ofrecen oportunidades y desafíos en diversos dominios de datos (Tovar, 2018).

Otra tendencia tecnológica es el *gobierno de datos*, una práctica nueva que busca asignar autoridad y control sobre los datos y tomar decisiones relacionadas con ellos (Portilla, 2017). Aparte de centrarse en los datos, la gobernanza también se enfoca en los sistemas y las personas involucradas, ya que se requiere colaboración entre organizaciones y personas para una gobernanza efectiva (Janssen et al., 2020). La gobernanza inteligente utiliza tecnologías de la información y la comunicación para gestionar, analizar y difundir datos, e implica también un proceso complejo de cambio institucional (Martínez, 2018).

La última tendencia en el factor de cambio de ciencia de los datos es la extracción automatizada de datos web, una técnica para extraer datos de la web utilizando HTTP o navegadores web. Es valioso para los científicos de datos debido a su bajo costo y capacidad para obtener grandes cantidades de información en línea (Khder, 2021). Además de la extracción manual, se pueden utilizar *bots* o rastreadores web para automatizar el proceso (Zhao, 2012).

La ciencia de datos reúne tendencias asociadas con captura, protección, procesamiento y gobernanza de la información. En la manufactura, este factor resulta estratégico porque la competitividad futura dependerá cada vez más de la capacidad de convertir datos en decisiones. La ciberseguridad, el análisis de grandes volúmenes de datos, la gobernanza de datos y la extracción automatizada de información constituyen, en este marco, capacidades complementarias para la gestión inteligente del negocio y de la producción.

Fuentes energéticas eficientes

Son fenómenos físicos o químicos explotables con fines económicos o biofísicos (Jurado y Taipe, 2022). Las fuentes de energía se dividen en dos: no renovables, como los combustibles fósiles, y renovables, como la energía solar y la eólica. La eficiencia energética es crucial para obtener los mismos resultados con menor

consumo de energía, sin desmejorar la calidad de vida (Calle, 2021; Porras y Moreira, 2022).

Este factor comprende cuatro tendencias: uso eficiente de infraestructura y energía, eficiencia energética, fuentes que brinden confiabilidad y estabilidad a los sistemas solares y eólicos, y compatibilidad electromagnética.

Con respecto al *uso eficiente de infraestructura y energía*, la red eléctrica deberá gestionar flujos bidireccionales en el futuro, integrar generación intermitente y contar con infraestructura digital y de telecomunicaciones para una gestión más efectiva.

De acuerdo con Chalco (2017), la optimización del consumo eléctrico mediante la respuesta a la demanda es crucial para brindar un servicio eficiente y rentable en el sistema eléctrico. La respuesta a la demanda implica cambiar el hábito de uso de la energía eléctrica para mejorar el rendimiento de las cargas y reducir la demanda en horas pico. Se utilizan métodos multiobjetivo para predecir y tomar decisiones sobre el consumo, y también se implementan normas para minimizar aún más el consumo eléctrico y contribuir al cuidado del medio ambiente.

Por otro lado, la *eficiencia energética* se logra minimizando la cantidad de energía requerida para satisfacer la demanda, pero sin afectar la calidad del servicio. La producción y distribución de energía eléctrica mundial no es eficiente, y solamente un 35 % de la energía producida se aprovecha. Se puede mejorar la eficiencia energética a través del diseño y la implementación de tecnologías, procedimientos operativos y mantenimiento adecuado de equipos (Vargas-Isaza et al., 2015).

Sobre las fuentes que brindan confiabilidad y estabilidad a los sistemas solares y eólicos, los *sistemas fotovoltaicos y eólicos* son fuentes de energía limpia y renovable, pero presentan retos en la planificación y operación de los sistemas de potencia debido a su variabilidad e incertidumbre. Para abordar esto, se utilizan herramientas como el Atlas Solar Global que ayudan a identificar lugares adecuados para sistemas fotovoltaicos (Gutiérrez-Perdomo, 2021).

Por otra parte, el objetivo de la compatibilidad electromagnética (CEM) es mantener todos estos efectos secundarios bajo un control razonable. La CEM designa todas las técnicas y tecnologías existentes y futuras para reducir las perturbaciones y mejorar la inmunidad (European Commission, 2025). Con el aumento en

el número de dispositivos electrónicos y sistemas de telecomunicación, la CEM se ha vuelto más relevante para garantizar un funcionamiento adecuado (Martsis-hko, 2022).

Este factor agrupa tendencias relacionadas con el uso racional de la energía, la optimización de infraestructura y la confiabilidad técnica de sistemas energéticos. Su presencia entre los resultados muestra que la transformación manufacturera no depende solo de digitalización, sino también de mejoras en desempeño energético y de condiciones técnicas que permitan mayor estabilidad operativa. Se trata, por tanto, de un factor con implicaciones simultáneas para competitividad y sostenibilidad.

Diversificación de la matriz energética

Colombia busca integrar energías renovables aprovechando su enorme potencial (Pupo-Roncallo et al., 2019). La diversificación de la matriz energética, incluyendo energías renovables, es esencial para una transición sostenible hacia sistemas bajos en carbono (Barragán, 2016). Las energías renovables son cruciales para combatir el cambio climático, ya que son económicamente viables y socialmente aceptadas, y se espera que aumenten de manera significativa para 2050 (Barrón et al., 2021).

Este factor de cambio involucra las siguientes tendencias: transición energética en zonas no interconectadas, almacenamiento de energías alternativas, fuentes alternativas más estables como la geotermia y biomasa, hidrógeno verde e hidrógeno azul, y movilidad eléctrica.

Las *zonas no interconectadas* (ZNI) necesitan una solución local de energización asequible y confiable. Las energías renovables, como la solar, la hidroeléctrica y el diésel, son opciones viables para satisfacer estas necesidades y reducir emisiones (Esteve, 2011).

En relación con la tendencia de *almacenamiento de energías alternativas*, el desafío de las energías renovables es su intermitencia, lo que requiere sistemas de información robustos para administrar la demanda y el exceso de generación (Mendoza, 2016). El almacenamiento de energía con baterías es crucial para aumentar la confiabilidad de fuentes como la eólica y la solar (Slaughter, 2016). Adicionalmente, hay tecnologías emergentes, como sistemas basados en aire líquido y nanoultracapacitores, que ofrecen alternativas prometedoras para almacenar energía (Mayo et al., 2019).

Otra de las tendencias es hacia las *fuentes más estables y limpias*, como la *geotermia* y la *biomasa*. La energía geotérmica aprovecha el calor interno de la tierra y puede ser renovable si se recarga al mismo ritmo que se extrae, en tanto que la biomasa abarca los desechos orgánicos de la vida cotidiana, la industria, la cría de ganado y la descomposición de residuos, excluyendo los combustibles fósiles y los productos sintéticos (Him et al., 2022; Verdezoto et al., 2021).

El *hidrógeno verde* y el *hidrógeno azul* son la siguiente tendencia, tomando en cuenta que la descarbonización global para 2050 es un objetivo compartido por varias naciones. Para enfrentar este reto, los países están haciendo uso del hidrógeno que no funciona como fuente principal de energía, sino como portador energético. Requiere energía para ser producido y tiene la capacidad de almacenarla para su liberación gradual en momentos necesarios (Giménez, 2021). Se clasifica por origen y emisiones de dióxido de carbono (CO₂): el hidrógeno verde es de fuentes renovables, libre de carbono en su ciclo de vida (Jiménez, 2020), y el hidrógeno azul se produce a partir de combustibles fósiles, pero las emisiones de CO₂ derivadas se captan y almacenan. Su producción involucra reformado de metano con vapor y reformado autotérmico (Massarweh et al., 2023).

La tendencia de la *movilidad eléctrica* engloba los sistemas y equipos que respaldan el transporte mediante vehículos eléctricos. Incluye desde micromovilidad hasta vehículos de carga (Sustainable Mobility for All). América Latina y el Caribe avanzan a ritmos diferentes en esta transición, aprovechando condiciones propicias y fabricantes de autos (PNUMA, 2021).

La diversificación de la matriz energética emerge como un factor de alcance estratégico para el sector manufacturero, al incorporar tendencias vinculadas con almacenamiento, energías alternativas, hidrógeno y movilidad eléctrica. Este conjunto de cambios sugiere que las empresas manufactureras enfrentarán un entorno en el que la transición energética dejará de ser periférica para convertirse en una dimensión estructural de la innovación, la inversión tecnológica y la adaptación del modelo productivo.

Inteligencia artificial

La inteligencia artificial (IA) implica hacer que los computadores realicen tareas inteligentes, antes exclusivas

de humanos (Zhang, C., y Lu, 2021). La palabra *artificial* denota algo sintético y la palabra *inteligencia* es clave, ya que abarca un rango de atributos o habilidades (Chávez, 2020). La interacción de la IA con otras disciplinas, como biotecnología, nanotecnología y cognotecnología, forma un conjunto holístico para abordar los desafíos contemporáneos (Baroni, 2019).

Este factor de cambio comprende el aprendizaje automático, el aprendizaje profundo y la inteligencia artificial en sí misma.

La tendencia del *aprendizaje automático* permite a los sistemas aprender a partir de datos y automatizar la construcción de modelos analíticos para resolver tareas específicas (Janiesch et al., 2021). El aprendizaje profundo es una técnica basada en múltiples capas de procesamiento; ha tenido éxito en diversas áreas, incluyendo reconocimiento de patrones, visión por computador, medicina y más, al descubrir estructuras complejas en grandes conjuntos de datos mediante algoritmos de retropropagación (LeCun et al., 2015).

Como tendencia, la IA abarca cinco subtipos: el aprendizaje automático, entendido como los algoritmos que descubren patrones ocultos en los datos y hacen predicciones basadas en nuevos datos; el aprendizaje profundo, un subtipo del aprendizaje automático que usa redes neuronales artificiales para predicciones complejas; el procesamiento de lenguaje natural, el cual les facilita a los computadores la tarea de comprender el lenguaje humano, y la visión por computador, que permite que las máquinas reconozcan y entiendan imágenes y videos, emulando la percepción humana (Zúñiga, 2022).

La inteligencia artificial aparece como uno de los factores más decisivos para el futuro del sector. La inclusión de aprendizaje automático, aprendizaje profundo e inteligencia artificial en sentido amplio indica una transición hacia sistemas capaces de apoyar predicción, automatización cognitiva, reconocimiento de patrones y toma de decisiones asistida. Su relevancia no radica solamente en la eficiencia operativa, sino también en la reconfiguración de capacidades empresariales y tecnológicas.

Singularidad tecnológica

Representa un futuro en el que avances tecnológicos generen cambios profundos en la sociedad (Gayozzo,

2021). Varios autores han expresado esta idea en diferentes versiones, con ritmos de crecimiento variados. Kurzweil predice que en unos quince años las máquinas dominarán recursos y la humanidad dará paso a una civilización posbiológica (Dieguez, 2016).

Este factor involucra dos tendencias: el internet de las cosas y las tecnologías convergentes. El internet de las cosas (también llamado “internet de los objetos”) representa una expansión de internet más allá de la comunicación entre personas, e involucra la interconexión de objetos cotidianos por medio de sensores y dispositivos (Barrio, 2018). Se caracteriza por su interconectividad, servicios relacionados con objetos, heterogeneidad y cambios dinámicos (Agencia Nacional del Espectro [ANE], 2022).

El término *tecnologías convergentes* se refiere a la integración de tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) con nanotecnología, biotecnología y ciencias cognitivas, creando sinergias científicas para el conocimiento, innovación y satisfacción de necesidades humanas (Morán, 2019). Emergen como disciplinas que abarcan tanto las ciencias de la vida como las ciencias de la información, generando conocimientos innovadores, diseñando formas de vida y creando organismos nuevos. La interacción de la nanotecnología, la biotecnología, la bioinformática y las ciencias cognitivas es sinérgica, buscando mejorar a la humanidad y transformar la producción económica global (Toscano, 2023).

Este factor agrupa el internet de las cosas y las tecnologías convergentes NBIC. Aunque se trata del factor más prospectivo del conjunto, señala cambios de largo alcance, asociados con la integración entre tecnologías digitales, biológicas, materiales y cognitivas. En la manufactura, este factor sugiere escenarios de mayor convergencia tecnológica y de transformación más profunda en productos, procesos y modelos de negocio.

En conjunto, los factores de cambio identificados permiten evidenciar que la transformación del sector manufacturero no responde a la adopción aislada de tecnologías, sino a procesos de integración y convergencia tecnológica. En este sentido, los resultados sugieren que la competitividad futura de las empresas dependerá de su capacidad para articular tecnologías digitales, sistemas energéticos eficientes y capacidades analíticas avanzadas. Esta integración configura un entorno en el que la innovación no solo es tecnológica, sino también organizacional y estratégica.

Síntesis de resultados

A partir de los resultados obtenidos, se identifican tres ejes principales de transformación:

- Digitalización de procesos productivos.
- Gestión inteligente de datos y toma de decisiones.
- Transición hacia modelos energéticos sostenibles.

Estos ejes sintetizan la interacción entre los factores de cambio y permiten estructurar la lectura de las dinámicas emergentes del sector.

DISCUSIÓN

Implicaciones para las empresas manufactureras

Los resultados muestran que las empresas manufactureras de base tecnológica en Bogotá deberán fortalecer capacidades de adaptación tecnológica, gestión de datos y rediseño de procesos para sostener su competitividad en la próxima década. En particular, factores como almacenamiento en la nube, automatización, ciencia de los datos e inteligencia artificial indican que la transformación del sector dependerá menos de la adopción aislada de herramientas y más de su integración en la operación, la toma de decisiones y la innovación empresarial.

Estos resultados son coherentes con estudios sobre industria 4.0 que destacan la centralidad de la digitalización y la automatización en la transformación manufacturera (Schwab, 2017; Tropschuh et al., 2021). No obstante, el presente estudio aporta una visión más contextualizada al identificar la articulación específica entre factores tecnológicos en el contexto de Bogotá.

Relación entre los factores de cambio tecnológico

Los factores identificados no actúan de manera independiente, sino que conforman un sistema de transformación. El almacenamiento en la nube y la automatización operan como habilitadores de captura e integración de información; la ciencia de los datos y la inteligencia artificial amplían su valor mediante analítica, predicción y apoyo a la decisión, y los factores energéticos introducen una dimensión de sostenibilidad y adaptación productiva. Estos resultados muestran, en conjunto, una convergencia entre digitalización, automatización y transición energética.

Prioridad relativa e impacto esperado de las tendencias

Aunque en el estudio no se establece una jerarquización cuantitativa estricta, sí se pueden identificar tendencias con mayor incidencia esperada. En un primer nivel se ubican almacenamiento en la nube, automatización, ciencia de los datos e inteligencia artificial, por su impacto más inmediato en eficiencia operativa, centralización de información y toma de decisiones; en un segundo nivel se sitúan *blockchain*, realidad mixta, ciudades inteligentes, diversificación de la matriz energética y singularidad tecnológica, cuyo efecto es más estructural y a mediano plazo. Esta distinción permite diferenciar entre tecnologías de impacto operativo y tecnologías de transformación estratégica.

A diferencia de otros estudios en los que se abordan estas transformaciones desde una perspectiva global, los resultados obtenidos muestran particularidades asociadas al contexto local, especialmente en la relevancia de los factores energéticos y su vínculo con la estructura productiva del sector analizado.

Trayectorias de transformación del sector

A partir de los hallazgos, se pueden identificar tres trayectorias de transformación. La primera corresponde a la digitalización de la infraestructura productiva y administrativa, apoyada en nube, automatización y sistemas integrados; la segunda remite a una manufactura basada en datos, donde convergen ciencia de los datos e inteligencia artificial, y la tercera se relaciona con la transición energética y la convergencia tecnológica, visible en redes inteligentes, energías alternativas y tecnologías NBIC. En este sentido, el futuro del sector manufacturero dependerá de la capacidad de combinar eficiencia operativa, sostenibilidad y visión prospectiva.

Desde el punto de vista académico, el principal aporte de este estudio radica en la identificación estructurada de factores de cambio tecnológico a partir de un enfoque prospectivo basado en expertos, aplicado a un contexto sectorial específico. En la práctica, los resultados ofrecen insumos para la toma de decisiones empresariales y la formulación de estrategias de innovación en entornos caracterizados por alta incertidumbre tecnológica.

Así mismo, los hallazgos sugieren la necesidad de fortalecer capacidades organizacionales orientadas a la integración tecnológica, así como de promover polí-

ticas públicas que faciliten la adopción de tecnologías emergentes en el sector manufacturero.

CONCLUSIONES

El estudio permitió identificar diez factores de cambio tecnológico que configurarán el entorno de las empresas manufactureras de base tecnológica en Bogotá durante la próxima década. En conjunto, estos resultados muestran que la transformación del sector no estará determinada por tecnologías aisladas, sino por la convergencia entre digitalización, automatización, analítica de datos, inteligencia artificial y transición energética, como ejes que reconfigurarán la competitividad empresarial.

Desde una perspectiva académica, el principal aporte del estudio radica en la identificación estructurada de factores de cambio tecnológico por medio de un enfoque prospectivo basado en consulta a expertos, aplicado a un contexto sectorial específico. Este enfoque permite avanzar en la comprensión de las dinámicas de transformación tecnológica más allá de aproximaciones generales, incorporando particularidades propias del entorno manufacturero en Bogotá.

Los hallazgos sugieren que el desarrollo futuro de estas empresas dependerá de su capacidad para articular infraestructura digital, gestión inteligente de la información, eficiencia energética y adaptación estratégica. En este orden de ideas, los resultados permiten evidenciar que la transformación del sector no depende solamente de la adopción tecnológica, sino también de la capacidad de las organizaciones para integrar dichas tecnologías en sus procesos, estructuras y estrategias, configurando nuevas formas de competitividad basadas en la articulación entre digitalización, analítica de datos y sostenibilidad.

En el presente artículo se ofrecen insumos para que las empresas prioricen inversiones tecnológicas, fortalezcan capacidades organizacionales y orienten sus estrategias de innovación y adaptación. Así mismo, puede servir como referente para actores del ecosistema empresarial y académico interesados en comprender las transformaciones tecnológicas que incidirán en la manufactura de base tecnológica en Bogotá.

No obstante, el estudio presenta limitaciones asociadas al carácter cualitativo del enfoque y al número de expertos consultados, lo que restringe la generalización de los resultados a otros sectores o contextos.

En este sentido, en futuras investigaciones se podrían incorporar enfoques cuantitativos o mixtos, así como ampliar el análisis a otros sectores manufactureros o regiones, con el propósito de validar y complementar los hallazgos obtenidos.

Finalmente, es importante señalar que el alcance del estudio se concentra en empresas manufactureras de base tecnológica de Bogotá, con énfasis en las divisiones de fabricación de aparatos y equipo eléctrico y de maquinaria y equipo n.c.p. Por este motivo, los resultados se deben interpretar en función de este contexto sectorial específico, aunque ofrecen una base analítica útil para futuras investigaciones sobre transformación tecnológica en otros segmentos de la industria.

REFERENCIAS

- Agencia Nacional del Espectro (2022). *Espectro para entender el crecimiento futuro y la masificación de aplicaciones IOT*. [https://www.ane.gov.co/Sliders/archivos/gestión técnica/ Estudios de gestión y planeación/Espectro para IoT/Documentos para consulta/DocumentoEspectroIoT.pdf](https://www.ane.gov.co/Sliders/archivos/gestión_técnica/Estudios_de_gestión_y_planeación/Espectro_para_IoT/Documentos_para_consulta/DocumentoEspectroIoT.pdf)
- Aguayo Z., D. E., y Navia L., A. M. (2018). *Evaluación de la eficiencia energética en la implementación de un sistema de iluminación en la carrera de Agroindustria de la Espam-MFL*. Espam MFL.
- Amaro-Rosales, M., y Robles-Belmont, E. (2020). Medir la innovación en el contexto de las tecnologías emergentes y convergentes: algunas reflexiones metodológicas. *Paakat. Revista de Tecnología y Sociedad*, 10(18), 1-22.
- Arias C., V. H. (2015). *Impacto en las dimensiones organizacionales durante la implementación de un sistema ERP en la empresa Comestibles Aldor S.A., 2013-2014*.
- Barragán O., A. S. (2016). *Cambio de la matriz energética ecuatoriana en el marco de la Declaración de Río, derecho comparado y la norma ecuatoriana*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Barrio A., M. (2018). *Internet de las cosas*. Editorial Reus.
- Barrón C., A., Centurión C., M., Ferreyros C., L., Forero C., G., López V., G., y Markovinovic G., L. (2021). *La importancia del uso de energías renovables en centros comerciales en Lima*. Universidad de Lima. Repositorio institucional. <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/14421>
- Bee-Lan, L., Ming-Yu, C. y Chee-Keong, C. (2021). The relationship between soft skills training and development, human resource outcome and firm performance. *International Journal of Business and Society*, 22(1), 382-402. <https://doi.org/10.33736/ijbs.3184.2021>
- Biga, M. E. (2020). *Automatización robótica de procesos para declaraciones juradas impositivas. Regímenes de retención y percepción provinciales*.
- Bockholt, N. (2017). Realidad virtual, realidad aumentada, realidad mixta. Y ¿qué significa "inmersión" realmente? *Thinkwithgoogle*, 1-6.
- Bouncken, R. B., Kraus, S., y Roig-Tierno, N. (2021). Knowledge- and innovation-based business models for future growth: digitalized business models and portfolio considerations.

- Review of Managerial Science*, 15(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11846-019-00366-z>
- Calán P., J. C., y Ruales Y., Á. P. (2018). *Implementación de biomasa y energía solar en una vivienda ecológica temporal en la empresa Autopartes y Autogrúas FCN S.A., con una capacidad de 1,5 kW/h*. Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Repositorio institucional. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16142>
- Calle I., R. E. (2021). *Impacto potencial del uso de la energía solar en la economía boliviana*. Universidad Mayor de San Andrés. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/26088>
- Campillo, M. (2017). *Prefabricación en la arquitectura: impresión 3D en hormigón*. Universidad Politécnica de Madrid. <http://oa.upm.es/47556/>
- Cano M., J. J. (2022). Criptoactivos. *Revista Sistemas*, 163, 94-106. <https://doi.org/10.29236/sistemas.n163a6>
- Chalco C., J. M. (2017). *Optimización multiobjetivo del consumo eléctrico basado en la respuesta a la demanda*. Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13539>
- Chalén Z., D. K. (2016). *Impacto social de los medidores inteligentes en las áreas Kennedy, Urdenor I, Urdenor II, en la ciudad de Guayaquil*. Universidad de Guayaquil.
- Chávez V., A. (2020). Rediseñando la titularidad de las obras: inteligencia artificial y robótica. *Revista Chilena de Derecho y Tecnología*, 9(2), 153. <https://doi.org/10.5354/0719-2584.2020.57674>
- Congreso de la República de Colombia (2021). Ley 2099 de 2021. <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/ley-2099-del-10-de-julio-de-2021.pdf>. <https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.10>
- Dieguez, A. (2016). La singularidad tecnológica y el desafío poshumano. *Pasajes. Revista de Pensamiento Contemporáneo*, 50, 154-164.
- Esteve G., N. (2011). *Energización de las zonas no interconectadas a partir de las energías renovables solar y eólica*. Pontificia Universidad Javeriana. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.10554.6078>
- European Commission (2025, 25 de agosto). *The Electromagnetic Compatibility Directive (EMCD)*. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/electrical-and-electronic-engineering-industries-eei/electromagnetic-compatibility-emc-directive_en#:~:text=La%20Directiva%20de%20compatibilidad%20electromagn%C3%A9tica,se%20vean%20afectados%20por%20ellas
- Fernández, D. S. (2017). Factores de desarrollo de las ciudades inteligentes. *Revista Universitaria de Geografía*, 26(1), 135-152.
- Fula B., M. L. (2013). *Implementación de equipo de energía renovable (solar y eólica) en la Universidad Militar Nueva Granada*. Universidad Militar Nueva Granada. <http://hdl.handle.net/10654/11983>
- Giménez Z., I. (2021). Retos del hidrógeno verde. *Economía Aragonesa*, 73, 104-119. <https://negociosostenible.camara-valencia.com/wp-content/uploads/2021/07/economia-aragonesa-revista-73-Hidrogeno-Verde-2.pdf>
- Gómez S., Ó. (2020). *Ingeniero de proyectos en apoyo a las diferentes actividades realizadas en la empresa EC Ingeniería Eléctrica SAS*. Universidad de Antioquia. Repositorio institucional.
- Góngora, G. (2015). Revisión de literatura sobre ciudades inteligentes: una perspectiva centrada en las TIC. *Ingeniare*, 19, 137-149.
- González Pérez, G. (2022). Automatización y dinámica del mercado laboral en la industria automotriz en México. *Economía. Teoría y Práctica*, 56(1), 67-104. <https://dx.doi.org/10.24275/etypuam/ne/562022/>
- Gutiérrez-Perdomo, A. S. (2021). *Sistemas de energía eólica y solar para la alimentación de luminarias*. Universidad Católica de Colombia. <https://hdl.handle.net/10983/25553>
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw Hill Education. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hernández-Leal, E. J., Duque-Méndez, N. D., y Moreno-Cadavid, J. (2017). *Big data: una exploración de investigaciones, tecnologías y casos de aplicación*. *Tecnológicas*, 20(39), 15-38. <https://doi.org/10.22430/22565337.685>
- Him M., M., Humphries, A., Fuentes, P., y Chen Austin, M. (2022). Evaluación del potencial geotérmico inverso y solar para reducir el consumo energético de una instalación hospitalaria en Panamá. *Novasinerгия. Revista Digital de Ciencia, Ingeniería y Tecnología*, 5(1), 83-99. <https://doi.org/10.37135/ns.01.09.06>
- Iacono, L., Bustos, M., y Chiaradia, F. (2018). *Evaluación del impacto económico de la automatización en procesos administrativos en Argentina. Caso de estudio: Cencosud*.
- Janiesch, C., Zschech, P., y Heinrich, K. (2021). Machine learning and deep learning. *Electronic Markets*, 31(3), 685-695. <https://doi.org/10.1007/s12525-021-00475-2>
- Janssen, M., Brous, P., Estevez, E., Barbosa, L. S., y Janowski, T. (2020). Data governance: organizing data for trustworthy artificial intelligence. *Government Information Quarterly*, 37(3). <https://doi.org/10.1016/j.giq.2020.101493>
- Jiménez S., F. L. (2020). *Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil*. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175586>
- Jorquera O., A. (2016). *Fabricación digital: introducción al modelado e impresión 3D*.
- Jurado L., M. A., y Taípe Sailema, G. M. (2022). *Diseño de la infraestructura de una red 5G para la ciudad de Ambato*. Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/36148>
- Khder, M. A. (2021). Web scraping or web crawling: state of art, techniques, approaches and application. *International Journal of Advances in Soft Computing and its Applications*, 13(3), 144-168. <https://doi.org/10.15849/ijasca.211128.11>
- LeCun, Y., Bengio, Y., y Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- López Baroni, M. J. (2019). Las narrativas de la inteligencia artificial. *Revista de Bioética y Derecho*, 2019(46), 5-28. <https://doi.org/10.1344/rbd2019.0.27280>
- Malberti, M. A., Beguerí, G. E., Klenzi, R. O., Ortega, M. O., Olguín, L. A., Amaya, F., y Cortez, J. (2021). Visualizando la información en ciencia de datos. *XXIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2021, Chilecito, La Rioja)*, 296-300.
- Martínez-Arias, E. A. (2016). *Impacto del cambio tecnológico en la economía global y organizacional*. *Revista Teckne*, 14(1), 34-43. https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161/rw25065w/M1DIS08_U1_Impacto_tecnologico_en_la.pdf
- Martínez M., A. (2020). Retos en la implementación de industria 4.0: el caso de GKN Driveline. En A. Martínez, M. Álvarez y A. García (coords.), *Industria 4.0 en México. Elementos diagnósticos y puesta en práctica en sectores y empresas*. Plaza y Valdés Editores/UNAM. <https://www.researchgate.net/publication/346006091>
- Martsishko, Y. (2022). *Diseño e implementación de placas para prácticas de electrónica mediante la utilización de dispositi-*

- vos LDO y módulos conmutados. Universidad Politécnica de Cartagena. <http://hdl.handle.net/10317/11703>
- Massarweh, O., Al-Khuzaei, M., Al-Shafi, M., Bicer, Y., y Abus-haikha, A. S. (2023). Blue hydrogen production from natural gas reservoirs: a review of application and feasibility. *Journal of CO₂ Utilization*, 70, 102438. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102438>
- Mell, P., y Grance, T. (2011). *The NIST definition of cloud computing*. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-145.pdf>
- Mendoza D., A. (2016). *Almacenamiento de energía: los retos del futuro*. Tecnológico de Monterrey. http://hdl.handle.net/11285/630820disposition=inline%3B+filename%3DUNIVERSIDAD_EXTERNADO_DE_COLOMBIA_INSTIT.pdfExpires=1689782383ySignature=TxJonjez6hny-FVHm1xSyDDc5hi0mcjy~6
- Mendoza D., A. (2016). *Energía: pasado, presente y futuro*. http://hdl.handle.net/11285/630820disposition=inline%3B+filename%3DUNIVERSIDAD_EXTERNADO_DE_COLOMBIA_INSTIT.pdfExpires=1689782383ySignature=TxJonjez6hny-FVHm1xSyDDc5hi0mcjy~6
- Monitor Deloitte (2018). *Hacia la descarbonización de la economía: la contribución de las redes eléctricas a la transición energética*. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/es/Documents/estrategia/Deloitte-ES-descarbonizacion-redes-electricas-transicion.pdf>
- Morán R., A. A. (2019). Las tecnologías convergentes (nanotecnología, biotecnología y las ciencias cognitivas) y su relación con la bibliotecología. *e-Ciencias de la Información*. <https://doi.org/10.15517/eci.v9i2.35897>
- Murazzo, M., Millán, F., Rodríguez, N., Segura, D., y Villafañe, D. (2012). Desarrollo de aplicaciones para cloud computing. *XVI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 941-949. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/19374/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Okoli, C. (2019). Developing theory with theoretical concept reviews. *SSRN Electronic Journal*, 2014, 1-65. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3452134>
- Onwuegbuzie, A. J., Leech, N. L., y Collins, K. M. T. (2012). Qualitative analysis techniques for the review of the literature. *Qualitative Report*, 17(28), 1-28. <https://doi.org/10.46743/2160-3715/2012.1754>
- Ortiz A., L. M. (2021). Uso del big data en las empresas. *Molequla. Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 42(13), 47-49. <http://www.upo.es/MoleQla>
- Ovalle C., E. A. (2020). *Capacidades técnicas, legales y de gestión para equipos Blueteam y Redteam*.
- PNUMA (2021). *Movilidad eléctrica: avances en América Latina y el Caribe* (4.ª ed.). <https://movelatam.org/4ta-edicion/>
- Porras G., J. C., y Moreira Z., D. (2022). Estado actual de la eficiencia energética en el transporte y almacenamiento de gas: terminal Monteverde. *Sapientia: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 3(6), 40-153. <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i6.495>
- Portilla R., J. D. (2017). Gobierno de datos, un potenciador de los sistemas de gestión de calidad. *Signos. Investigación en Sistemas de Gestión*, 9(2), 159-172. <https://doi.org/10.15332/s2145-1389.2017.0002.10>
- Posada M., R. (2017). El cibercrimen y sus efectos en la teoría de la tipicidad: de una realidad física a una realidad virtual. *Nuevo Foro Penal*, 13(88), 72-112. <https://doi.org/10.17230/nfp.13.88.3>
- Provost, F., y Fawcett, T. (2013). Data science and its relationship to big data and data-driven decision making. *Big Data*, 1(1), 51-59. <https://doi.org/10.1089/big.2013.1508>
- Pupo-Roncallo, O., Campillo, J., Ingham, D., Hughes, K., y Pourkashanian, M. (2019). Large scale integration of renewable energy sources (RES) in the future Colombian energy system. *Energy*, 186, 115805. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.135>
- Queiroz C., A. (2018). El concepto de tendencia de moda: significado, historia, connotación. *Universidade do Estado de Santa Catarina*, 31-48.
- Ramos T., J. F. (2020). *Fundamentos de data science y sus aplicaciones en distintas industrias*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Retamal, C. D., Roig, J. B., y Tapia, J. L. (2017). La blockchain: fundamentos, aplicaciones y relación con otras tecnologías disruptivas. *Economía Industrial*, 405, 33-40.
- Ríos M., A. C., Medina, C. A., y González, G. (2022). La flexibilidad y otros retos de la integración masiva de generación eólica y solar en los sistemas de potencia. *Prisma Tecnológico*, 13(1), 88-96. <https://doi.org/10.33412/pri.v13.1.3229>
- Sánchez, L., y Ramírez, J. (2020). *Taxonomía de aplicaciones y videojuegos de realidad mixta*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/653135>
- Schuh, G., Scholz, P., y Patzwald, M. (2019). Technological trends in context of industry 4.0 and their industrial applications. *60th International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University, ITMS. 2019 - Proceedings*, 2-7. <https://doi.org/10.1109/ITMS47855.2019.8940720>
- Schwab, K. (2017). *The fourth industrial revolution*. Crown Publishing Group. https://law.unimelb.edu.au/_data/assets/pdf_file/0005/3385454/Schwab-The_Fourth_Industrial_Revolution_Klaus_S.pdf
- Slaughter, A. (2016). Almacenamiento de electricidad. *Tecnologías, impacto y perspectivas*. *Cuaderno de Energía*, 48. https://www.enerclub.es/wp-content/uploads/2016/06/cen48_08_andrewslaughter.pdf
- Sustainable Mobility for All (2021). *Movilidad eléctrica sostenible: componentes esenciales y recomendaciones de políticas*. *GRA in action serie*. <https://www.mobiliseyourcity.net/es/node/784>
- Tassey, G. (2013). Beyond the business cycle: the need for a technology-based growth strategy. *Science and Public Policy*, 40(3), 293-315. <https://doi.org/10.1093/scipol/scs106>
- Tello-Maita, J., y Marulanda-Guerra, A. (2017). Modelos de optimización para sistemas de potencia en la evolución hacia redes inteligentes: una revisión. *DYNA*, 84(202), 102-111. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n202.63354>
- Toscano L., D. (2023). Molecular Biopolitics and artificial production of life: biogeneration and infogeneration devices. *EN-Claves del Pensamiento*, 34, e566. <https://doi.org/10.46530/ecdp.v0i34.566>
- Tovar G., H. W. (2018). *Big data: la próxima frontera en la toma de decisiones gerenciales*. <https://www.researchgate.net/publication/344293780>
- Tropschuh, B., Dillinger, F., Korder, S., Maier, M., Gärtner, Q., y Vernim, S. (2021). Industrie 5.0 – ein menschzentrierter Ansatz. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116(6), 387-392. <https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0091>
- Valencia, A., y Portilla, P. (2021). *Internet industrial de las cosas (IIOT): nueva forma de fabricación inteligente*, 1-9. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://univ-dafup.edu.co/repositorio/files/original/0cba2296f09e033fe6c5c08e5a6a0119.pdf>
- Vallecillos, J. (2014). Computación en la nube: un estudio orientado para el despliegue de arquitecturas de componentes.

- Applied Computing Group*, 1-17. <http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/2673/estudioCloudComputing2014.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- Vargas-Isaza, C. A., Posada-Correa, J. C., Jaramillo-Zapata, L. Y., y García, L. A. (2015). Consumos de energía en la industria del plástico: revisión de estudios realizados. *Revista CEA*, 1(1), 93-107. <https://doi.org/10.22430/24223182.70>
- Velásquez, A., y Sepúlveda, T. L. (2015). Fundamentos de la prospectiva "la disciplina del cambio". *Semestre Económico*, 3(6), 153-160. <https://revistas.udem.edu.co/index.php/economico/article/view/1426>
- Vemuri, V. K. (2019). Blockchain: a practical guide to developing business, law, and technology solutions. *Journal of Information Technology Case and Application Research*, 20(3-4), 1-3. DOI:10.1080/15228053.2019.1588546
- Verdezoto, L., Parco, F., Jácome, C., Katan, W., y Mora, A. (2021). Energía renovable a partir de la biomasa de la caña de azúcar. *Revista de Investigación Talentos*, 8(1), 9-26. <https://doi.org/10.33789/talentos.8.1.140>
- Wilson, R., Rašovec, T., Kriechel, B., Bakule, M., Czesaná, V., y Havlíčková, V. (2017). *Guía para anticipar y ajustar la oferta de competencias con la demanda del mercado de trabajo* (vol. 2). ETF-Cefop-ILO (eds.), <https://doi.org/10.2816/524509>
- Zabidin, N. S., Belayutham, S., y Che Ibrahim, C. K. I. (2019). A bibliometric analysis of industrial revolution (IR) 4.0 in construction engineering education. *Matec Web of Conferences*, 266, 05006. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201926605006>
- Zhang, C., y Lu, Y. (2021). Study on artificial intelligence: the state of the art and future prospects. *Journal of Industrial Information Integration*, 23, 100224. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100224>
- Zhang, R., Xue, R., y Liu, L. (2019). Security and privacy on blockchain. *ACM Computing Surveys*, 52(3). <https://doi.org/10.1145/3316481>
- Zhao, Y. (2012). *R and data mining: examples and case studies*. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-06686-3>
- Zúñiga S., L. (2022). Inteligencia artificial en las organizaciones. *Investiga TEC*, 15(45), 21-24. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga_tec/article/view/6387/6133

Determinantes del precio de oferta de vivienda en Hermosillo: un modelo hedónico en el fraccionamiento Altares

Determinants in housing offer prices in Hermosillo: A hedonic model in Altares subdivision

GERARDO URIBE-RAMÍREZ¹ - MARCO RAMOS-CORELLA² - JUAN CARO-BECERRA³ - JESÚS QUINTANA-PACHECO⁴ - ISRAEL MIRANDA-PASOS⁵ - ISRAEL EDUARDO MIRANDA-TORRES⁶

1. PhD. Gestión y Valoración Urbana y Arquitectónica. Universidad de Sonora Hermosillo México.
gerardo.ramirez@unison.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7036-764X>

2. PhD. Ingeniería de Proyectos: Medio Ambiente, Seguridad, Calidad y Comunicación. Universidad de Sonora Hermosillo México.

marco.ramos@unison.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6543-7017>

3. Máster, en Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de la Zona Metropolitana (San Pedro Tlaquepaque, Jalisco, México)

juancarobecerra@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3884-2188>

4. PhD. Gestión y Valoración Urbana y Arquitectónica. Universidad de Sonora Hermosillo México.
jesus.quintana@unison.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1797-6213>

5. PhD. en Ingeniería. Universidad de Sonora Hermosillo México.

israel.miranda@unison.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0525-9789>

6. Magister en Ingeniería Civil. Universidad de Sonora Hermosillo México.

israeleduardo.miranda@unison.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3745-7365>.

Recibido: 11/10/2025 Aceptado: 29/10/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se desarrolla un modelo de precios hedónicos para estimar el valor de oferta de viviendas en el fraccionamiento Altares, en el sur de Hermosillo (Sonora). Se delimitó el área de estudio y se identificaron atributos claves, como superficie construida, superficie de terreno, número de habitaciones, baños y calidad de materiales. Con datos obtenidos de plataformas inmobiliarias y analizados en IBM SPSS Statistics 19, se construyó un modelo estadístico orientado a la estimación de precios; sin embargo, no se reportan métricas específicas de desempeño que permitan sustentar afirmaciones sobre su eficiencia o margen de error.

La herramienta resulta potencialmente útil para valuadores, ya que permite hacer estimaciones ágiles; no obstante, se debe considerar como limitación que en el estudio se utilizan precios de oferta (*listings*), los

cuales pueden diferir de los precios reales de transacción. El estudio se basa en marcos teóricos de la valuación inmobiliaria en México, considerando factores como localización, infraestructura y plusvalía. La metodología representa una alternativa práctica frente a los métodos tradicionales y puede apoyar la toma de decisiones en el mercado habitacional, siempre que se reconozcan sus alcances y limitaciones.

Palabras claves: estimación de precio de venta, modelo de precios hedónicos, valoración urbana.

Abstract

This article develops a hedonic pricing model to estimate the listing value of homes in the Altares subdivision, south of Hermosillo, Sonora. The study area was delimited and key attributes such as built area, land area, number of bedrooms, bathrooms, and material quality

were identified. Using data obtained from real estate platforms and analyzed with IBM SPSS Statistics 19, a statistical model aimed at price estimation was constructed; however, no specific performance metrics are reported to support claims regarding its efficiency or margin of error. The tool is potentially useful for appraisers, as it allows for agile estimates; nevertheless, it should be noted as a limitation that the study uses listing prices, which may differ from actual transaction prices. The study is based on theoretical frameworks of real estate valuation in Mexico, considering factors such as location, infrastructure, and property value appreciation. The methodology represents a practical alternative to traditional methods and can support decision-making in the housing market, provided its scope and limitations are recognized.

Keywords: sale price estimation, hedonic pricing model, urban valuation.

INTRODUCCIÓN

El mercado inmobiliario constituye un componente esencial en la dinámica socioeconómica de las ciudades, ya que refleja no solo las condiciones de oferta y demanda de vivienda, sino también factores asociados a la localización, la infraestructura y la calidad del entorno urbano. En el caso de Hermosillo, capital del estado de Sonora, el crecimiento acelerado de la mancha urbana —particularmente hacia la zona sur— y los cambios en los patrones de uso del suelo han generado transformaciones significativas en los valores de los inmuebles, lo cual plantea la necesidad de contar con herramientas analíticas que permitan comprender mejor su comportamiento.

Dentro de estas herramientas, los modelos de precios hedónicos han demostrado ser una metodología eficaz para explicar la formación de precios en función de las características físicas, estructurales y locacionales de las propiedades. Este enfoque permite identificar qué atributos explican el precio de oferta de la vivienda y cuantificar su contribución relativa en el valor inmobiliario.

En este contexto, se cuestiona lo siguiente: ¿qué atributos estructurales explican el precio de oferta de la vivienda en el fraccionamiento Altares, en el sur de Hermosillo?

Derivado de esto, el objetivo general es estimar una función hedónica para el precio de oferta de vivienda y evaluar su desempeño predictivo. Como objetivos específicos, se busca identificar los atributos estructurales relevantes, analizar su incidencia en el precio de oferta y valorar el alcance del modelo como herramienta de apoyo a la valuación inmobiliaria.

El alcance del estudio se delimita espacialmente al fraccionamiento Altares y colonias cercanas del sur de Hermosillo; temáticamente, al segmento de vivienda de interés social y nivel medio, y temporalmente, al periodo de recolección de datos correspondiente a la muestra analizada de ofertas inmobiliarias.

En primer lugar, en el artículo se presenta el marco de referencia teórico sobre modelos hedónicos; posteriormente, se describen la metodología empleada y la construcción de la base de datos; a renglón seguido, se exponen los resultados del modelo estimado y su análisis estadístico, y por último, se presentan las conclusiones, limitaciones y líneas futuras de investigación.

Ámbito de estudio

Desde la antigüedad se ha requerido el intercambio de bienes, y con el transcurso del tiempo y el crecimiento poblacional, estos intercambios se han presentado con mayor frecuencia, generando necesidad de herramientas para estimar el valor de bienes y facilitando el intercambio, recaudación de impuestos, créditos hipotecarios, etc. Las colonias del sur de Hermosillo, como el fraccionamiento Altares en cada una de sus secciones, no están libres de estos cambios, pues todos estos aspectos influyen en la plusvalía de las viviendas.

En el fraccionamiento Altares, construido durante los años noventa, predominaban las viviendas de interés social y de nivel medio. Su vía principal es la calle Ernesto López Riesgo, que en sus inicios servía para que los habitantes se trasladaran a su lugar de trabajo. Al principio, muy pocos pobladores tenían vehículo propio y la mayoría de ellos utilizaban el transporte urbano, pero con el transcurso de los años el sur de Hermosillo fue creciendo y surgieron nuevas colonias alrededor del fraccionamiento Altares, sección Franciscanos.

Este crecimiento y el incremento promedio de vehículos por familia generaron cambios por la vialidad principal Ernesto López Riesgo, así como un aumento en los comercios y servicios localizados a lo largo de esta.

MARCO DE REFERENCIA

En la teoría de precios hedónicos, formalizada por Rosen (1974), se plantea que el precio de un bien heterogéneo —como la vivienda— se puede descomponer en

el valor implícito de sus atributos. Con este enfoque, los consumidores no demandan el bien en sí mismo, sino el conjunto de características que lo componen, tales como superficie, número de habitaciones, localización y calidad del entorno (Rosen, 1974).

El modelo hedónico permite estimar la contribución marginal de cada atributo al precio observado, constituyendo una herramienta ampliamente utilizada en economía urbana, valuación inmobiliaria y análisis del mercado habitacional (Malpezzi, 2003; Sirmans, Macpherson y Zietz, 2005). Su aplicación resulta particularmente pertinente en contextos en los que existe heterogeneidad en la oferta de vivienda, como ocurre en ciudades en expansión.

Este enfoque asume que el mercado se encuentra en equilibrio, que los agentes cuentan con información suficiente y que los precios reflejan la valoración conjunta de los atributos estructurales y locacionales del inmueble (Rosen, 1974).

Formas funcionales del modelo hedónico

Una de las decisiones metodológicas centrales en la estimación hedónica corresponde a la selección de la forma funcional. En la bibliografía existente se emplean comúnmente especificaciones lineales, log-lineales y semilogarítmicas, cada una con implicaciones distintas para la interpretación de los coeficientes (Cropper, Deck y McConnell, 1988).

La forma logarítmica es frecuente en estudios inmobiliarios debido a que permite interpretar los efectos en términos porcentuales y contribuye a reducir problemas de asimetría en la distribución de precios (Halvorsen y Palmquist, 1980). Así mismo, los modelos hedónicos suelen enfrentar heterocedasticidad, fenómeno característico de datos inmobiliarios debido a la variabilidad en precios y características de los inmuebles, por lo que es habitual aplicar pruebas diagnósticas y estimadores robustos (Gujarati y Porter, 2009).

Variables explicativas en modelos hedónicos

La bibliografía coincide en clasificar las variables hedónicas en tres grandes grupos (Sirmans et al., 2005; Malpezzi, 2003):

- Atributos estructurales, que describen características físicas del inmueble, como superficie construida, tamaño del terreno, número de recámaras, baños, antigüedad y calidad constructiva.
- Atributos locacionales, relacionados con accesibilidad, distancia a centros de empleo, conectividad vial y proximidad a servicios.
- Atributos del entorno o vecindario, que incluyen infraestructura urbana, equipamiento, seguridad, áreas verdes y calidad del entorno urbano.

Esta clasificación permite captar la naturaleza multidimensional del valor inmobiliario y facilita la interpretación del modelo (Sirmans et al., 2005).

Dependencia espacial en el análisis inmobiliario

El valor de la vivienda presenta a menudo dependencia espacial, ya que los precios de inmuebles cercanos se tienden a influir mutuamente. Esta característica ha motivado la incorporación de modelos espaciales en la bibliografía hedónica, los cuales permiten captar efectos de autocorrelación y *spillovers* entre propiedades (Anselin, 1988; LeSage y Pace, 2009).

Aun cuando no en todos los estudios se implementan modelos espaciales, sí se reconoce su relevancia conceptual, especialmente en contextos urbanos donde la localización desempeña un papel central en la formación de precios (Anselin, 1988). En consecuencia, la consideración —explícita o implícita— de la dimensión espacial constituye un elemento importante en el diseño del análisis hedónico.

Un aspecto crítico en la investigación hedónica corresponde a la naturaleza de los datos utilizados. En numerosos estudios se emplean precios de oferta provenientes de plataformas inmobiliarias debido a su disponibilidad; sin embargo, estos pueden diferir de los precios efectivos de transacción, lo que introduce un posible sesgo (Genesove y Mayer, 2001; Bokhari y Geltner, 2011).

Así mismo, el uso de plataformas puede generar problemas de selección muestral, duplicidad de registros o falta de información sobre características relevantes del inmueble. En la bibliografía reciente se hace hincapié en la necesidad de reconocer estas limitaciones y reportarlas explícitamente como parte del alcance del estudio (Bokhari y Geltner, 2011).

Enfoques econométricos y aprendizaje automático

En años recientes, se han incorporado técnicas de aprendizaje automático en el análisis del mercado inmobiliario que buscan mejorar la capacidad predictiva frente a modelos econométricos tradicionales (Kok, Monkkonen y Quigley, 2014; Mullainathan y Spiess, 2017).

No obstante, los modelos hedónicos econométricos se continúan utilizando bastante debido a su interpretabilidad y a su capacidad para estimar efectos marginales de los atributos, lo cual resulta particularmente relevante en estudios de valuación y análisis urbano (Sirmans et al., 2005). En este sentido, la elección metodológica depende del objetivo del estudio, diferenciando entre predicción y explicación (Mullainathan y Spiess, 2017).

METODOLOGÍA

El presente proyecto tiene la finalidad de facilitar la estimación del valor de oferta de mercado de inmuebles (tipo residencial). Para su desarrollo, en el siguiente diagrama metodológico se muestra una serie de etapas que hay que realizar (figura 1).

Etapas I. Definición de las variables de estudio

Para la generación del modelo para la estimación del valor de oferta de inmuebles, se definieron las siguientes variables dependientes e independientes.

- **Variable dependiente.** Será la variable valor de oferta de vivienda residencial.
- **Variables independientes.** Entre estas variables se consideraron las siguientes: superficie de construcción (m^2), superficie de terreno (m^2), número de recámaras (pieza), número de baños (pieza), número de medios baños (pieza), unidades de estacionamiento (pieza), ubicación de la manzana, calidad de la construcción, calidad de servicios, etc.

Etapas II. Delimitación de la investigación

- **Delimitación geográfica.** Se consideraron para este trabajo las viviendas localizadas en el fraccionamiento Altares y alrededores, del ámbito de estudio.
- **Delimitación del tipo de inmueble.** Se trabajó con vivienda de interés social y nivel medio.

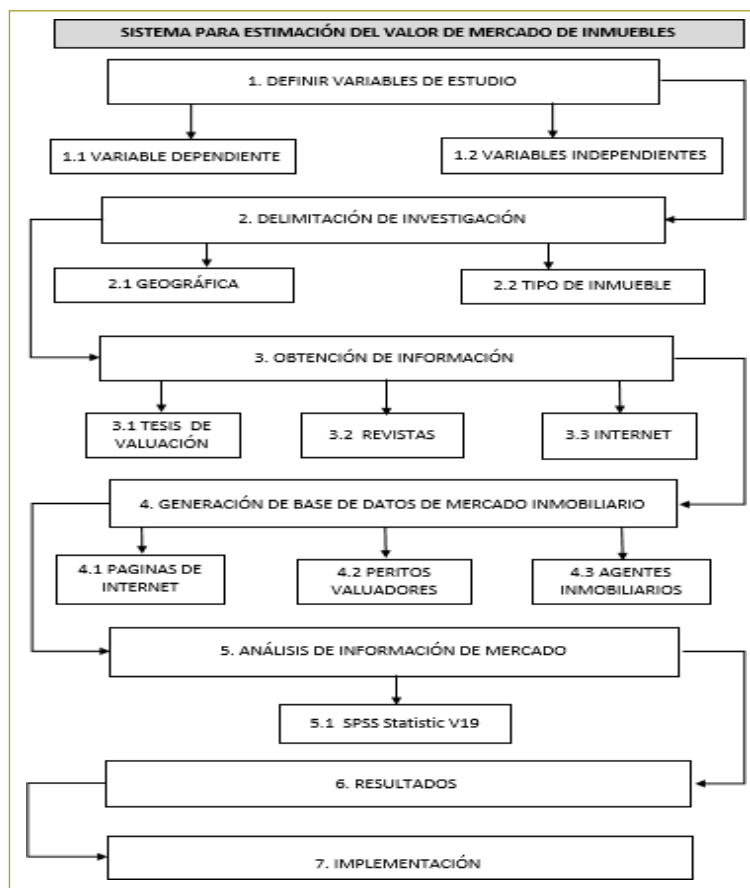


Figura 1. Diagrama metodológico (resumen).

Etapas III. Obtención de información

- **Tesis de valuación.** Se tomarán como referencia tesis relacionadas con estimación del valor de vivienda en Hermosillo, plusvalía, modelo de precios hedónicos y trabajos relacionados con valuación y atributos que hay que considerar en valuación de viviendas.
- **Revistas de valuación.** Se consultarán artículos de revistas de valuación de vivienda.
- **Páginas de internet.** Se consultarán páginas que tengan información relacionada con valuación.

Datos

La base de datos utilizada en este estudio está conformada por $N = 48$ observaciones correspondientes a viviendas de interés social y nivel medio ubicadas en el fraccionamiento Altares y colonias aledañas en Hermosillo (Sonora).

La información se recolectó durante el periodo noviembre de 2024-noviembre de 2025 a partir de plataformas inmobiliarias en línea (por ejemplo: Inmuebles24, Vivanuncios, Facebook Marketplace y portales de agencias locales).

Los precios corresponden a precios de oferta publicados por los anunciantes. No se dispone de precios de cierre, por lo que este aspecto constituye una limitación del estudio.

Los valores monetarios se expresan en pesos mexicanos corrientes y no se aplicaron ajustes por inflación debido al corto periodo de recolección.

Se definieron criterios explícitos de inclusión y exclusión. Se incluyeron viviendas unifamiliares localizadas dentro del área de estudio, con información completa en variables estructurales relevantes. Se excluyeron registros sin precio, viviendas con información incompleta, duplicados y propiedades atípicas (por ejemplo, viviendas de lujo o remodelaciones no comparables).

Los duplicados se identificaron mediante coincidencias en dirección, superficie, características estructurales y precio, conservándose únicamente un registro por propiedad.

Etapas IV. Generación de base de datos del mercado inmobiliario

- **Páginas de internet/Marketplace.** Se obtendrá información de mercado inmobiliario, considerando las delimitaciones de la etapa II.
- **Peritos valuadores.** Se pedirá información de avalúos de vivienda del fraccionamiento Altares de Hermosillo (Sonora) a profesionales de la valuación.
- **Agentes inmobiliarios.** Se solicitará información de ofertas de vivienda del fraccionamiento Altares de Hermosillo (Sonora) a profesionales inmobiliarios.

Variables

Las variables categóricas se transformaron en variables numéricas/ *dummy*.

- Calidad_Vivienda
0 = baja
0,5 = media
1 = alta

- Edo_Conservación
0 = malo
0,5 = regular
1 = bueno
- Cerrada (*dummy*)
1 = vivienda encerrada
0 = no

Se corrige la formulación estadística relativa a los supuestos del modelo. La normalidad no constituye un requisito de la variable dependiente en modelos OLS; la normalidad relevante corresponde a los residuos del modelo para fines de inferencia clásica. Dado el tamaño muestral moderado, se contempla el uso de errores robustos para garantizar inferencias válidas en presencia de heterocedasticidad.

Etapas V. Análisis de información de mercado

Se utilizará el programa estadístico SPSS Statistic V19 como herramienta para la generación de estadística descriptiva de las bases de datos, mediante análisis de regresión múltiple.

Así también, se hará lo siguiente:

1. Verificar que los datos de la variable dependiente cuantitativa (precio de oferta de la vivienda de interés social y nivel medio) presenten una distribución normal; esta se realizará con pruebas paramétricas, aplicando prueba de revisión de la significancia estadística Sig. > 0,05.
2. Se graficará histograma de los datos de la variable dependiente para visualizar que los datos presenten una distribución normal.
3. En caso de que la distribución no sea normal, es decir, cuando la significancia estadística Sig. < $p = 0,05$, deberá contener la variable dependiente será necesario repetir los pasos 1 y 2.

Modelo

Modelo econométrico

Se estimó un modelo de regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados ordinarios.

Se evaluaron dos formas funcionales:

- Lineal.
- Log-lineal (log del precio).

La transformación logarítmica se considera recomendable en modelos hedónicos debido a:

- Reducción de heterocedasticidad.
- Interpretación como elasticidades.
- Estabilización de varianza.

Diagnóstico del modelo

El tratamiento de valores atípicos se realiza mediante análisis gráfico (diagramas de caja), residuos estandarizados y medidas de influencia (distancia de Cook). Las observaciones influyentes se revisan individualmente antes de su eventual exclusión.

A diferencia de lo indicado originalmente, la normalidad no se exige en la variable dependiente sino en los residuos para inferencia clásica.

Se evalúan:

- Heterocedasticidad (Breusch–Pagan/White).
- Multicolinealidad (VIF).
- Observaciones influyentes (Cook).
- Análisis gráfico residuos vs. Predicho.

Cuando sea necesario, se utilizan errores robustos.

Validación predictiva

Para evaluar desempeño predictivo:

- Validación cruzada o *train/test*
- Métricas:
 - MAE
 - RMSE
 - MAPE

RESULTADOS

Etapa I. Variables de estudio

Lo que se pretende es generar un modelo para estimar el valor de oferta de inmuebles (vivienda de interés social y media), y para esto tenemos las siguientes variables dependientes e independientes.

- **Variable dependiente.** Será la variable valor de oferta de vivienda interés social y media del fraccionamiento Altares y sus alrededores, en el sur de Hermosillo.
- **Variables independientes.** Entre estas variables, se están considerando las siguientes: superficie de construcción (m^2), superficie de terreno (m^2), número de recámaras (pieza), número de baños (pieza), número de medios baños (pieza), unidades de estacionamiento (pieza), número de frentes de acuerdo con su ubicación en la manzana, calidad de la construcción y estado de conservación.

Etapa II. Delimitación de la investigación

- **Delimitación geográfica.** Para este trabajo, se consideran las viviendas localizadas en el fraccionamiento Altares. El proyecto está ubicado en el sur de la población de Hermosillo; colinda al oeste con el Centro Ecológico, al norte con la avenida Xólotl y al sur muy cercano al bulevar Jahudiel Zamorano L. (figura 2).
- **Delimitación del tipo de inmueble.** Se trabajará con vivienda de interés social y media.



Figura 2. Fraccionamiento Altares y alrededores.

Etapa III. Información obtenida

Se obtuvo información de proyectos relacionados con estimación del valor de vivienda en Hermosillo, plusvalía, modelo de precios hedónicos y trabajos relacionados con valuación y atributos que hay que considerar en valuación de inmuebles residenciales.

- **Revistas de valuación.** Se consultaron artículos de revistas de valuación de vivienda.
- **Páginas de internet.** Se consultaron páginas con información relacionada con valuación.

Etapa IV. Generación de base de datos del mercado inmobiliario

- **Páginas de internet/Marketplace.** Se obtuvo información sobre la oferta en fraccionamientos y residenciales de la zona de estudio.
- **Peritos valuadores.** Se solicitaron avalúos de viviendas en el fraccionamiento Altares.
- **Agentes inmobiliarios.** Se buscó información sobre ofertas de vivienda en el fraccionamiento Altares y sus alrededores, pero hubo complicaciones para obtener datos precisos del área.

Etapa V. Análisis de información de mercado

Descripción de variables

Para el análisis del modelo se consideraron variables propias de los inmuebles, como superficie de terreno y construcción (en m²), número de recámaras, baños, medios baños, plantas y estacionamientos (en piezas).

- **Calidad de los materiales.** Esta variable tomará valores entre 0 y 1, dependiendo del tipo de materiales, donde 0 es para una calidad de materiales muy mala y 1 es para una calidad de los materiales muy buena. Esta variable tendrá valores entre 0 y 1, donde 0 es para un estado muy malo de conservación y 1 es para un estado muy bueno de conservación.

Revisión del comportamiento

A continuación, se muestra el comportamiento de precio de oferta; para este análisis, el resultado del comportamiento se considera normal (figura 3).

Modelo de Regresión Lineal Múltiple

Este análisis tiene como propósito la obtención de un modelo de precios hedónicos, mediante la utilización de las características más importantes que conforman el precio de oferta de la vivienda en la zona, aplicando la técnica de regresión lineal múltiple aproximada por mínimos cuadrados ordinarios (tabla 1).

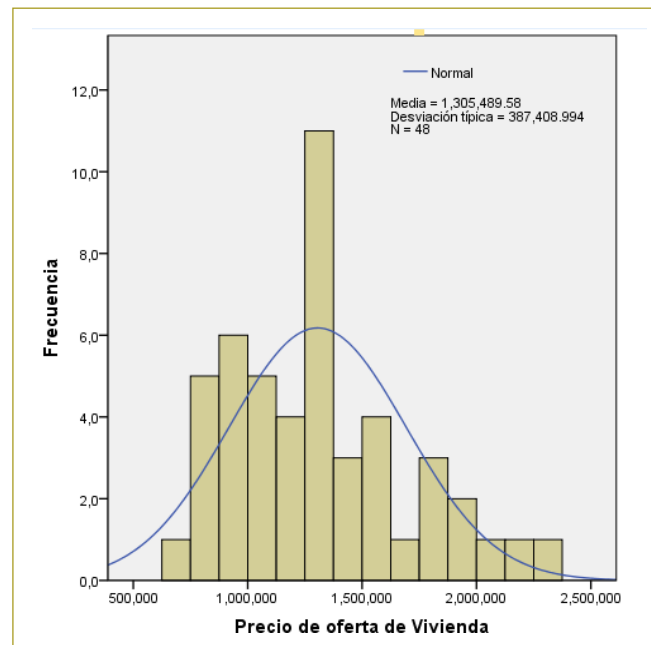


Figura 3. Comportamiento de precio de oferta.

Tabla 1

Estadísticos descriptivos de cada variable de la muestra, conformado por media, desviación típica (desviación estándar)

Estadísticos descriptivos			
Variable	Media	Desviación típica	Nº
Precio de oferta de vivienda	1.305.489,58	387.408,99	48
ST_m ²	127,91	22.379	48
SC_m ²	8.991.08	29.287.51	48
No_Frentes	1,04	0,202	48
No_Recámaras	2,56	0,58	48
No_Baños	1,46	0,617	48
No_MBaños	029	0,459	48
No_estac	1,44	0,542	48
No_Plantas	1,31	0,468	48
Calidad_Vivienda	0,969	0,03103	48
Edo_Conservacion	0,969	0,03526	48

La muestra está conformada por N = 48 viviendas de interés social y nivel medio ubicadas en el fraccionamiento Altares y colonias aledañas del sur de Hermosillo.

El precio de oferta presenta:

- Media: \$1.305.489,58
- Desviación estándar: \$387.408,99

Lo anterior indica dispersión moderada dentro del segmento analizado.

Las variables estructurales muestran variabilidad suficiente (SC_m^2 , ST_m^2 , número de recámaras, baños y estacionamientos). Sin embargo, las variables Calidad_Vivienda y Edo_Conservacion presentan medias de 0,969 y desviaciones estándar muy bajas ($\approx 0,03$), lo que evidencia escasa variabilidad en la muestra. Esta concentración limita su poder explicativo y su contribución marginal dentro del modelo.

Se estimó una matriz de correlaciones (Pearson) para evaluar asociaciones lineales entre variables continuas. Se identificó alta correlación entre:

- Superficie construida (SC_m^2).
- Superficie de terreno (ST_m^2).

Debido a que ambas variables captan dimensiones relacionadas con el tamaño del inmueble, su inclusión simultánea generaba redundancia explicativa. Por criterios de parsimonia y menor colinealidad (VIF más bajo), se decidió conservar SC_m^2 , excluyendo ST_m^2 del modelo final.

Matriz de correlaciones y selección de variables

Con el fin de evaluar posibles problemas de asociación lineal entre las variables explicativas, se estimó una matriz de correlaciones de Pearson para las variables cuantitativas del modelo (Precio, SC_m^2 , ST_m^2 , No_Recamaras, No_estac, entre otras). Como contraste, también se verificó la consistencia mediante el coeficiente de Spearman, y se obtuvieron resultados similares en magnitud y dirección.

En la tabla siguiente (tabla 2) se muestran los resultados, los cuales presentan una correlación alta y positiva entre la superficie construida (SC_m^2) y la superficie de terreno (ST_m^2), lo cual es estructuralmente esperable en vivienda de interés social y nivel medio, donde el tamaño del lote suele guardar relación directa con el tamaño edificado. La magnitud de la correlación supera el umbral comúnmente aceptado de 0,70-0,80, lo que

sugiere riesgo potencial de multicolinealidad en caso de incluir ambas variables simultáneamente en la regresión.

Adicionalmente, se evaluó el factor de inflación de la varianza (VIF, por su sigla en inglés) en especificaciones preliminares que incluían ambas variables, observándose incremento en los indicadores de colinealidad. Con criterios de parsimonia, estabilidad de coeficientes y mayor poder explicativo individual, se decidió conservar SC_m^2 como variable representativa del tamaño del inmueble y excluir ST_m^2 del modelo final.

Esta decisión se fundamenta en:

- Mayor significancia estadística de SC_m^2 .
- Mejor desempeño del modelo (R^2 ajustado más alto).
- Menores valores de VIF.
- Interpretación económica más directa del efecto marginal por metro cuadrado construido.

Tabla 2
Matriz de correlaciones (Pearson)

Estadísticos descriptivos					
Variable	Precio	SC_m^2	ST_m^2	No_Recámaras	No_estac
Precio	1,000	0,915	0,842	0,781	0,642
SC_m^2	0,915	1,000	0,824	0,736	0,588
ST_m^2	0,842	0,824	1,000	0,690	0,511
No_Recámaras	0,781	0,736	0,690	1,000	0,476
No_estac	0,642	0,588	0,511	0,476	1,000

Todas las correlaciones son significativas al nivel $p < 0,01$.

La matriz de correlaciones muestra una asociación alta y positiva entre SC_m^2 y ST_m^2 ($r = 0,824$), lo cual confirma la relación estructural entre ambas variables y su potencial redundancia explicativa. Dado que la correlación supera el umbral comúnmente aceptado de 0,80 para riesgo de multicolinealidad, se optó por conservar únicamente SC_m^2 en el modelo final, debido a su mayor significancia estadística y mejor desempeño explicativo.

Se identificó una posible correlación alta entre la superficie construida (SC_m^2) y la superficie de terreno (ST_m^2), lo cual es común en vivienda de interés social y nivel medio debido a que el tamaño del lote suele estar directamente relacionado con la superficie edificada.

Por esto, se estimó la matriz de correlaciones de Pearson para evaluar la magnitud de dicha asociación. Los resultados mostraron una correlación elevada entre ambas variables, lo que sugiere redundancia explicativa y posible riesgo de multicolinealidad en caso de incluirlas simultáneamente en el modelo.

En función de este resultado y considerando criterios de parsimonia y estabilidad de los estimadores (evaluados mediante el VIF), se decidió conservar SC_m² como variable representativa del tamaño del inmueble y excluir ST_m² del modelo final.

Así mismo, durante el proceso de estimación se evaluaron diversas variables estructurales del inmueble, tales como superficie de terreno, calidad de la vivienda, estado de conservación, número de plantas y otras características del inmueble. No obstante, tras el proceso de selección de variables y diagnóstico econométrico—incluyendo análisis de significancia estadística, parsimonia del modelo y verificación de multicolinealidad— el modelo final incluyó únicamente tres variables estructurales: superficie construida (SC_m²), número de recámaras (No_Recámaras) y número de espacios de estacionamiento (No_estac).

Resumen del modelo

Se estimaron tres especificaciones por mínimos cuadrados ordinarios (OLS, por su sigla en inglés):

Modelo 1:

$$\text{Precio} = f(\text{SC}_m^2)$$

Modelo 2:

$$\text{Precio} = f(\text{SC}_m^2, \text{No_estac})$$

Modelo 3 (modelo final):

$$\text{Precio} = f(\text{SC}_m^2, \text{No_estac}, \text{No_Recámaras})$$

El modelo final se seleccionó con base en:

- Mayor R² ajustado.
- Significancia individual de coeficientes.
- Coherencia económica de los parámetros.
- Ausencia de multicolinealidad relevante.

A renglón seguido, se presenta el resumen de los modelos estimados mediante mínimos cuadrados

ordinarios, y también se reporta el estadístico Durbin-Watson; sin embargo, debido a que los datos corresponden a un corte transversal y no a una serie temporal, dicho estadístico no se interpreta como evidencia de autocorrelación de los residuos, por lo que su valor se reporta únicamente como referencia del procedimiento de estimación (tabla 3).

Tabla 3
Resumen del modelo

Estadísticos del modelo de regresión					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregido	Error típ. de la estimación	Durbin-Watson
1	0,885 ^a	0,784	0,753	162.456,56	
2	0,965 ^b	0,931	0,908	99411,77	
3	0,991 ^c	0,983	0,972	54255,74	1,497

Notas:

Variables predictoras: (Constante), SC_m²

Variables predictoras: (Constante), SC_m², No_estac

Variables predictoras: (Constante), SC_m², No_estac, No_Recámaras

Variable dependiente: Precio de oferta de vivienda

Para el modelo 3, se obtuvieron:

- R = 0,991.
- R² = 0,983.
- R² ajustado = 0,972.
- Error estándar de estimación = 54.255,74.

El R² ajustado indica que aproximadamente el 97,2 % de la variabilidad del precio de oferta se explica por las variables estructurales incluidas en el modelo.

El modelo presenta un coeficiente de determinación R² = 0,983, lo que indica que las variables explicativas incluidas logran explicar el 98,3 % de la variabilidad del precio de oferta de la vivienda.

Cabe señalar que el alto valor del coeficiente de determinación se puede explicar, en parte, por la relativa homogeneidad del segmento de vivienda analizado dentro de la muestra. Las observaciones corresponden a inmuebles con características estructurales y niveles de calidad similares, lo que reduce la variabilidad de algunas variables explicativas—como calidad de la vivienda y estado de conservación—, y puede contribuir a que el modelo presente un ajuste elevado.

Análisis de la varianza (Anova)

A renglón seguido (tabla 4), se muestra el resultado del análisis de varianzas Anova, donde la hipótesis de igualdad de varianzas se considera nula por ser 0,000.

Tabla 4
Análisis de varianza Anova

Anova. Análisis de varianza del modelo de regresión					
Fuente	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	42.350	3	2,118	11,84	0
Residual	4650	45	0,179		
Total	47.000	48			

Variable dependiente: Precio de oferta de vivienda
Predictoras: ST_m², SC_m², No_Frentes, No_Recámaras, No_Baños
No_estac, No_Plantas, Calidad_Vivienda, Edo_Conservación, Cerrada

El estadístico F del modelo resulta estadísticamente significativo ($p < 0,001$), lo que indica que el conjunto de variables explicativas contribuye significativamente a explicar el precio de oferta.

Coefficientes

En la tabla siguiente (tabla 5) se muestran los coeficientes no estandarizados y estandarizados de cada modelo, así como sus estadísticas de colinealidad, donde la tolerancia y el factor de inflación de la varianza (FIV).

- Debemos tener un factor de inflación de la varianza (FIV) < 5 para evitar la multicolinealidad.
- Cuando los valores del índice de tolerancia son cercanos a 1, indica que la variable no presenta problemas de colinealidad.

Diagnóstico de colinealidad

Se verifica que el índice de condición sea menor que 30 para no tener colinealidad (tabla 6).

A continuación (figura 4), se muestran las frecuencias de los residuos estandarizados, los cuales tienen un comportamiento normal.

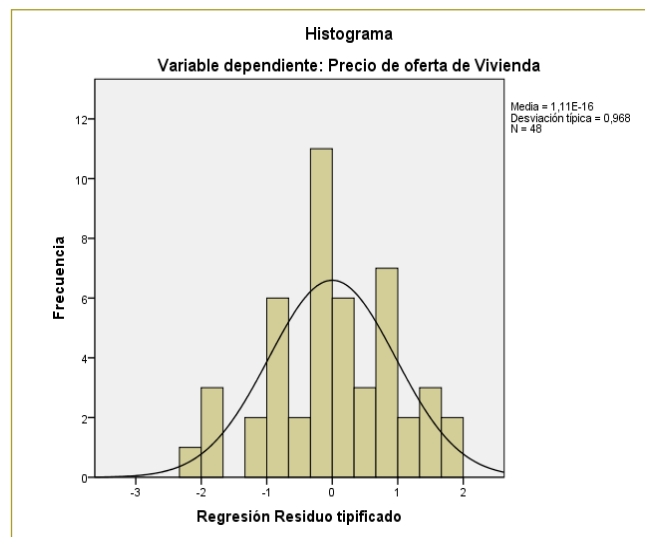


Figura 4. Histograma de frecuencias.

Tabla 5
Coeficientes del modelo

Coeficientes del modelo de regresión								
Modelo	Variable	B	Error típ.	Beta	t	Sig.	Tolerancia	FIV
1	(Constante)	1.144.818,31	185.709,02		6,163	0,541		
	No_Recamaras	464.808,30	70.719,57	0,696	6,573	0	1	1
2	(Constante)	-1.105.577,54	188.401,09		-5.868	0		
	No_Recámaras	436.070,51	66.251,40	0,653	6,582	0	0,978	1,022
	No_estac	207.733,18	70.865,79	0,291	2,931	0,006	0,978	1,022
3	(Constante)	-1.382.767,06	176486,44		-7,837	0		
	No_Recámaras	309.474,30	77.382,62	0,463	3,998	0	0,627	1,595
	No_estac	190.191,82	66.800,56	0,266	2,856	0,007	0,969	1,032
	SC_m²	41.968,65	15.396,95	0,317	2,73	0,009	0,623	1,604

Nota

a. Variable dependiente: Precio de oferta de vivienda.

Tabla 6
Diagnóstico de colinealidad

Diagnósticos de colinealidad							
Modelo	Dimensión	Autovalores	Índice de condición	(Constante)	No_Recámaras	No_estac	SC_m²
1	1	1,976	1	0,01	0,01	0,01	
	2	0,024	9,04	0,99	0,99	0,99	
2	1	2,892	1	0	0,05	0,13	
	2	0,084	5,861	0,05	0,91	0,94	
	3	0,023	11.086	0,95	0,03	0,04	
3	1	3,835	1	0	0	0	0
	2	0,114	5.806	0	0,12	0,12	0
	3	0,044	9.299	0,41	0,05	0,15	0,59
	4	0,019	14.305	0,59	0,83	0,73	0,29

Nota

Variable dependiente: Precio de oferta de vivienda.

A renglón seguido, se muestran los estadísticos sobre los residuos (tabla 7).

Ecuación para estimar precio de oferta de vivienda de interés social (1) y medio (2):

$$P_{\text{Modelo}} = -138.267,061 + (309.474,390 \cdot \text{No_recámaras}) + (190.198,21 \cdot \text{No_estac}) + (4.196,583 \text{ SC_m}^2) \quad (1)$$

Todos los coeficientes resultaron estadísticamente significativos ($p < 0,01$).

Interpretación económica

- Cada recámara adicional incrementa el precio en aproximadamente \$309.474.

- Cada espacio de estacionamiento incrementa el precio en aproximadamente \$190.192.

Cada metro cuadrado adicional de construcción incrementa el precio en aproximadamente \$41.969.

Con la ecuación 1 se generó el valor estimado (tabla 8, columna valor modelo).

Así también, se presenta una columna que indica el porcentaje de discrepancia en relación con el precio de oferta proporcionado por la fuente consultada para la investigación. Este porcentaje de error se calcula utilizando la siguiente fórmula (tabla 7):

$$\text{Porcentaje de error} = \frac{P_{\text{oferta}} - P_{\text{modelo}}}{P_{\text{oferta}}} \times 100 \quad (2)$$

Tabla 7
Estadísticos sobre los residuos

Medida	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	N
Valor pronosticado	905.888,81	1.965.991,63	1.305.489,58	307.420,53	48
Residual	-544.459,00	414.735,13	0	235.750,61	48
Valor pronosticado tip.	-1,3	2,149	0	1	48
Residuo tip.	-2,235	1,702	0	0,968	48

Nota

a. Variable dependiente: Precio de oferta de vivienda.

Tabla 8
Comparación del modelo

Datos	Colonia	Valor oferta	Valor modelo	Error (%)
1	Fraccionamiento Altares	800.000	943.658,035	18,00%
2	Fraccionamiento Altares	960.000	1.175.822,265	22,50%
3	Fraccionamiento Altares	1.200.000	1.238.771,081	3,20%
4	Colonia Altares	1.330.000	1.779.057,486	33,30%
5	Fraccionamiento Altares	1.550.000	1.365.607,243	12,00%
6	Fraccionamiento Altares	1.250.000	1.669.946,328	33,60%
7	Fraccionamiento Altares	2.195.000	1.863.600,354	15,10 %
8	Fraccionamiento Altares	1.450.000	1.558.047	7,40 %
9	Colonia Altares	1.250.000	1.396.871,935	11,20 %
10	Colonia Altares	1.200.000	1.238.771,081	3,20 %
11	Fraccionamiento Altares	1.200.000	1.258.043,608	4,80 %
12	Fraccionamiento Mallorca	1.250.000	1.247.583,056	0,20 %
13	Fraccionamiento Mallorca	960.000	964.640,95	0,50 %
14	Nuevo Hillo	1.250.000	964.640,95	22,90 %
15	Fraccionamiento Altares	1.100.000	1.338.267,502	21,20 %
16	Fraccionamiento Valle del Marqués	1.100.000	917.261,579	16,60 %
17	Fraccionamiento Valle del Marqués	1.350.000	995.264,869	30,70 %
18	Fraccionamiento Valle del Marqués	1.500.000	1.531.495,09	2,10 %
19	Fraccionamiento Valle del Marqués	1.050.000	1.067.601,94	1,60 %
20	Fraccionamiento Terranova	900.000	928.021,578	3,10 %
21	Fraccionamiento Terranova	890000	928.021,578	4,10 %
22	Villa Hermosa	1.300.000	1.247.164,197	4,10 %
23	Fraccionamiento Mallorca	1.250.000	964640.95	22,80 %
24	Residencial Gala	750.000	1025460.175	26,10 %
25	Residencial Gala	1.250.000	966487.425	22,70 %
26	Residencial Gala	980.000	1.303.491,421	33,00 %
27	Residencial Gala	1.250.000	964.640,95	22,80 %
28	Residencial Gala	840.000	905.888,78	7,80 %
29	Residencial Gala	720.000	905.888,78	25,80 %
30	Colonia Altares	900.000	1.167.482,12	29,70 %
31	Fraccionamiento Altares	1.738.595	1.446.067,38	16,80 %
32	Belcanto Residencial	1.780.000	1534778,72	13,70 %
33	Belcanto Residencial	1.900.000	1600727.72	15,80 %
34	Belcanto Residencial	2.070.000	1965991,65	5,00 %
35	Residencial Bonanza	1,500.000	1531495.09	2,10 %
36	Residencial Bonanza	1.390.000	1180090,32	15,10 %
37	Residencial Bonanza	1.149.500	1108650,92	3,60 %
38	Residencial Bonanza	1.377.500	1108650.92	19,50 %
39	Residencial Bonanza	1.350.000	1.531.495,09	13,40 %
40	Belcanto Residencial	1.786.500	1.600.727,72	10,40 %
41	Belcanto Residencial	1.700.000	1.429.583,91	15,90 %
42	Fraccionamiento Altares	2.251.500	1.531.495,09	32,00 %
43	Fraccionamiento Altares	850.000	964.640,95	13,50 %
44	Fraccionamiento Altares	850.000	905.888,78	6,30 %
45	Fraccionamiento Altares	1.290.000	1.531.495,09	18,70 %
46	Fraccionamiento Altares	1.250.000	1.531.495,09	22,50 %
47	Fraccionamiento Altares	1.290.000	1.590.884	18,90 %
48	Fraccionamiento Altares	1.250.000	1.435.468,409	15,10 %

En la tabla siguiente (tabla 9) se muestra el análisis de modelo hedónico con variables locacionales.

Tabla 9

Análisis de modelo hedónico con variables locacionales

Total de observaciones: 48
Colonias en la muestra: 9
Distribución por colonia:
Fraccionamiento Altares 20
Residencial Gala 6
Colonia Altares 4
Fracc. Valle del Marqués 4
Belcanto Residencial 4
Residencial Bonanza 4
Fraccionamiento Mallorca 3
Fraccionamiento Terranova 2
Nuevo Hillo 1
Villa Hermosa 1

A continuación, la incorporación de variables locacionales (tabla 10).

A renglón seguido, se muestra el resumen de errores por modelo (tabla 11).

Tabla 11

Resumen de errores por modelo

MAE (error absoluto (medio))	\$193.321,68
RMSE (Raíz ECM)	\$257.153,94
MAPE mediana	15.10 %
MAPE promedio	15.30 %

A continuación, se observan los errores absolutos (tabla 12).

Tabla 10

Incorporación de variables locacionales

a) Dummies por colonia creadas:				
- 10 zonas identificadas				
b) Distancias a ejes viales principales (km):				
	Colonia	dist_boulevard	dist_centro	dist_ecológico
Fraccionamiento Altares		0.8	8.5	0.5
Colonia Altares		1.2	7.8	0.9
Fraccionamiento Mallorca		2.5	6.2	1.8
Nuevo Hillo		3.1	5.5	2.3
FraccionamientoValle del Marqués		1.5	7	1.2
Fraccionamiento Terranova		2.0	6.5	1.5
Villa Hermosa		2.8	5.8	2.0
Residencial Gala 1,8 7,2 1,1		1,8	7,2	1,1
Belcanto Residencial		2,2	6	1,6
Residencial Bonanza		2,4	5,9	1,7
c) Coordenadas geográficas asignadas:				
Colonia		Latitud	Longitud	
Fraccionamiento Altares		29,0729	110,9559	
Colonia Altares		29,07	110,953	
Fraccionamiento Mallorca		29,068	110,95	
Nuevo Hillo		29,065	110,948	
Fraccionamiento Valle del Marqués		29,071	110,952	
Fraccionamiento Terranova		29,0695	110,9515	
Villa Hermosa		29,0665	110,949	
Residencial Gala		29,0705	110,9535	
Belcanto Residencial		29,0675	110,9495	
Residencial Bonanza		29,0685	110,9505	

Tabla 12
Errores absolutos

Estadísticas descriptivas de errores absolutos (%)	
Cantidad	48,00
Media	15,30
Desv. est.	10,00
Mín.	0,20
25 %	6,12
50 %	15,10
75 %	22,50
Máx.	33,60

A renglón seguido, se muestran los *outliers* (tabla 13).

Tabla 13
Identificación de outliers

Datos colonia	Valor oferta	Valor modelo	Error (%)	Error absoluto
6 Fraccionamiento Altares	\$1.250.000	\$1.669.946	33,6 %	\$419.946
4 Colonia Altares	\$1.330.000	\$1.779.057	33,3 %	\$449.057
26 Residencial Gala	\$980.000	\$1.303.491	33,0 %	\$323.491
42 Fraccionamiento Altares	\$2.251.500	\$1.531.495	32,0 %	\$720.005
17 Fraccionamiento Valle del Marqués	\$1.350.000	\$ 995.265	30,7 %	\$354.735

(Error > 30 %)

Total de *outliers* encontrados: 5 de 48 observaciones (10,4 %)

UMBRAL: Error porcentual absoluto > 30 %

Se muestran los *outliers* por colonia (tabla 14).

Tabla 14
Distribución de outliers por colonia

• Fraccionamiento Altares: 2 casos
• Colonia Altares: 1 caso
• Residencial Gala: 1 caso
• Fraccionamiento Valle del Marqués: 1 caso

La identificación de las influencias se puede observar en la tabla siguiente (tabla 15).

Tabla 15
Análisis de influencia (Cook's distance)

Datos colonia	Valor oferta	Error %	Cook's D	Influencia
7 Fraccionamiento Altares	\$2.195.000	15,1 %	1,8371	ALTA
31 Fraccionamiento Altares	\$1.738.595	16,8 %	1,6899	ALTA
42 Fraccionamiento Altares	\$2.251.500	32,0 %	0,8790	ALTA
2 Fraccionamiento Altares	\$960.000	22,5 %	0,8267	ALTA
41 Belcanto Residencial	\$1.700.000	15,9 %	0,7810	ALTA
1 Fraccionamiento Altares	\$800.000	18,0 %	0,6825	ALTA
32 Belcanto Residencial	\$ 1.780.000	13,7 %	0,6714	ALTA
34 Belcanto Residencial	\$2.070.000	5,0 %	0,5633	ALTA
3 Fraccionamiento Altares	\$1.200.000	3,2 %	0,5079	ALTA
6 Fraccionamiento Altares	\$1.250.000	33,6 %	0,5030	ALTA

Umbral de Cook's distance: > 0,0833

Observaciones con alta influencia: 12

TOP 10 OBSERVACIONES MÁS INFLUYENTES (Cook's distance)

DIAGNÓSTICO DEL MODELO

Multicolinealidad

Los valores de VIF para el modelo final son:

- No_Recámaras: 1,595
- No_estac: 1,032
- SC_m²: 1,604

Todos los valores son inferiores a 5, indicando ausencia de problemas graves de multicolinealidad.

Heterocedasticidad

Debido a que los datos son de corte transversal (*cross-sectional*), el estadístico Durbin-Watson no es apropiado para evaluar dependencia espacial o autocorrelación. Por esto, se sustituyó su interpretación por:

- Análisis gráfico residuos vs. valores ajustados
- Evaluación formal mediante prueba Breusch-Pagan

En caso de evidencia de heterocedasticidad, se recomienda el uso de errores estándar robustos para garantizar inferencia válida.

Residuos

Los residuos estandarizados se encuentran dentro del rango (-2,5, 2,5), lo cual indica ausencia de *outliers*.

extremos graves. El histograma sugiere aproximación razonable a normalidad, condición relevante para inferencia clásica en OLS.

EVALUACIÓN PREDICTIVA

- A partir de la comparación entre valores observados y estimados.
- Se observan discrepancias superiores al 20 % en algunos casos.

Esto sugiere que el modelo, aunque tiene un alto R^2 , puede presentar errores relevantes en determinadas colonias.

La heterogeneidad espacial (Mallorca, Residencial Gala, Belcanto, Valle del Marqués, etc.) indica que variables estrictamente estructurales no captan completamente efectos locacionales.

Por lo tanto, se recomienda incorporar en futuras especificaciones:

- *Dummies* por fraccionamiento.
- Variables de distancia a ejes viales o servicios.
- Componentes espaciales.

Así mismo, se deben reportar métricas globales:

- MAE.
- RMSE.
- MAPE (media y mediana).

Para evaluar adecuadamente el desempeño predictivo fuera de muestra.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que los atributos estructurales del inmueble constituyen determinantes fundamentales en la formación del precio de oferta de la vivienda, lo cual es consistente con la bibliografía clásica de modelos hedónicos planteada por Rosen (1974) y desarrollada en estudios posteriores de economía urbana.

En particular, la significancia estadística de variables como la superficie construida, el número de recámaras y los espacios de estacionamiento coincide con hallazgos reportados por Malpezzi (2003) y Sirmans et al. (2005),

quienes destacan el peso de los atributos físicos en la explicación del valor inmobiliario.

El alto coeficiente de determinación ajustado ($R^2 = 0,972$) evidencia una capacidad explicativa elevada del modelo estimado. Sin embargo, este resultado se debe interpretar con cautela. Tal como lo sugiere la bibliografía econométrica, valores elevados de R^2 en muestras relativamente homogéneas pueden estar asociados a una baja variabilidad en las características de los inmuebles analizados, más que a una capacidad predictiva robusta del modelo. En este caso, la concentración de viviendas dentro de un mismo segmento (interés social y nivel medio) y en un área geográfica acotada contribuye a este comportamiento.

Adicionalmente, el análisis de errores muestra que, a pesar del buen ajuste global del modelo, existen discrepancias relevantes en ciertos casos, con errores superiores al 20 %. Este resultado es coherente con lo planteado por Anselin (1988), quien señala que la omisión de efectos espaciales puede generar sesgos en la estimación de modelos hedónicos. En este sentido, la ausencia de variables locacionales explícitas en la especificación final del modelo limita su capacidad para captar diferencias entre fraccionamientos, accesibilidad a servicios o proximidad a infraestructura urbana.

Los resultados también evidencian que algunas variables inicialmente consideradas, como la calidad de la vivienda y el estado de conservación, presentan baja variabilidad dentro de la muestra, lo que reduce su poder explicativo. Este hallazgo resalta la importancia de la diversidad muestral en estudios hedónicos, así como la necesidad de incorporar variables que capten de manera más precisa la heterogeneidad del entorno urbano.

Por otra parte, el uso de precios de oferta como variable dependiente introduce un elemento adicional de discusión. De acuerdo con Genesove y Mayer (2001), los precios publicados en plataformas inmobiliarias pueden estar influenciados por sesgos de comportamiento, tales como expectativas del vendedor o estrategias de negociación, lo que implica que estos valores no necesariamente reflejan el precio de transacción efectivo.

En consecuencia, los resultados del modelo se deben interpretar como estimaciones del precio listado en el mercado y no como valores definitivos de mercado.

Finalmente, desde una perspectiva metodológica, en el presente estudio se reafirma la utilidad de los modelos hedónicos tradicionales como herramientas

interpretables para el análisis del mercado inmobiliario, en contraste con enfoques de aprendizaje automático que, si bien pueden mejorar la capacidad predictiva, suelen presentar menor interpretabilidad.

No obstante, futuras investigaciones podrían explorar la integración de ambos enfoques, combinando la robustez explicativa de los modelos econométricos con la capacidad predictiva de técnicas de *machine learning*.

En síntesis, los resultados obtenidos son consistentes con la teoría y evidencian la relevancia de los atributos estructurales en la formación de precios de vivienda; sin embargo, también ponen de manifiesto la necesidad de incorporar dimensiones espaciales y ampliar la base de datos para mejorar la capacidad explicativa y predictiva del modelo en contextos urbanos más complejos.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió estimar una función de precios hedónicos para analizar los determinantes del precio de oferta de vivienda en el fraccionamiento Altares y colonias cercanas del sur de Hermosillo. A partir del análisis econométrico hecho, se identificaron varios resultados relevantes.

En primer lugar, los hallazgos del modelo muestran que los atributos estructurales del inmueble constituyen factores determinantes en la formación del precio de oferta; en particular, la superficie construida (SC_{m^2}), el número de recámaras y el número de espacios de estacionamiento resultaron variables estadísticamente significativas dentro del modelo estimado. Estos resultados son consistentes con la bibliografía sobre modelos hedónicos, la cual señala que las características físicas del inmueble suelen explicar una proporción importante de la variación en los precios de vivienda.

En segundo lugar, respecto al desempeño del modelo, la especificación final presentó un coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) de 0,972, lo que indica que aproximadamente el 97,2 % de la variabilidad del precio de oferta se explica por las variables incluidas en la regresión; no obstante, la comparación entre valores observados y estimados muestra discrepancias en algunos casos, con errores superiores al 20 % en determinadas observaciones. Por este motivo, el desempeño del modelo se debe evaluar también mediante métricas predictivas globales, tales como MAE, RMSE y MAPE, las cuales permiten valorar

con mayor precisión su capacidad de estimación en aplicaciones prácticas.

En tercer lugar, el modelo presenta aplicabilidad principalmente en contextos urbanos con características similares al área de estudio, sobre todo en el segmento de vivienda de interés social y nivel medio localizado en el sur de Hermosillo.

En estas condiciones, el modelo puede constituir una herramienta de apoyo para valuadores, desarrolladores inmobiliarios y analistas del mercado habitacional, facilitando estimaciones preliminares del valor de oferta basadas en atributos estructurales observables.

Sin embargo, el estudio presenta diversas limitaciones que hay que considerar al interpretar los resultados. En primer término, los datos utilizados corresponden a precios de oferta publicados en plataformas inmobiliarias, los cuales pueden diferir de los precios reales de cierre de transacción. En segundo lugar, el tamaño de la muestra ($N = 48$) es relativamente reducido, lo que puede limitar la generalización de los resultados. Así mismo, el uso de plataformas digitales puede introducir sesgos de selección o duplicidad de registros, además del hecho de que el modelo no incorpora variables locacionales explícitas, lo cual puede explicar parte de las discrepancias observadas en fraccionamientos distintos dentro del área analizada.

Se identifican líneas de investigación futura que permitirían fortalecer el análisis. Entre ellas se recomienda ampliar la base de datos incorporando un mayor número de observaciones y periodos de análisis, integrar variables locacionales y espaciales que capten diferencias entre fraccionamientos, evaluar formas funcionales logarítmicas del modelo hedónico y explorar el empleo de modelos espaciales o técnicas de aprendizaje automático, con el objetivo de comparar su desempeño predictivo frente a los modelos econométricos tradicionales.

Los resultados obtenidos muestran que los modelos hedónicos constituyen una herramienta útil para el análisis del mercado inmobiliario a escala local, siempre que se consideren sus supuestos, limitaciones y el contexto específico en el que se aplican.

Finalmente, es importante señalar que los resultados obtenidos corresponden a estimaciones del precio de oferta de las viviendas analizadas; por lo tanto, los valores estimados se deben interpretar como aproximaciones al precio listado en el mercado inmobiliario y no

necesariamente como el valor de transacción efectivo de las propiedades.

REFERENCIAS

- Anselin, L. (1988). *Spatial econometrics: methods and models*. Kluwer Academic Publishers.
- Bokhari, S., y Geltner, D. (2011). Loss aversion and anchoring in commercial real estate pricing: empirical evidence and price index implications. *Real Estate Economics*, 39(4), 635-670. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6229.2011.00308.x>
- Cropper, M., Deck, L., y McConnell, K. (1988). On the choice of functional form for hedonic price functions. *The Review of Economics and Statistics*, 70(4), 668-675. <https://doi.org/10.2307/1927718>
- Genesove, D., y Mayer, C. (2001). Loss aversion and seller behavior: evidence from the housing market. *The Quarterly Journal of Economics*, 116(4), 1233-1260. <https://doi.org/10.1162/003355301753265561>
- Gujarati, D., y Porter, D. (2009). *Econometría* (5ª ed.). McGraw-Hill.
- Halvorsen, R., y Palmquist, R. (1980). The interpretation of dummy variables in semilogarithmic equations. *The American Economic Review*, 70(3), 474-475.
- Kok, N., Monkkonen, P., y Quigley, J. (2014). Economic geography, jobs, and regulations: the value of land and housing. *Regional Science and Urban Economics*, 48, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2014.05.002>
- LeSage, J., y Pace, R. (2009). *Introduction to spatial econometrics*. CRC Press.
- Malpezzi, S. (2003). Hedonic pricing models: a selective and applied review. In T. O'Sullivan y K. Gibb (eds.), *Housing economics and public policy* (pp. 67-89). Blackwell.
- Mullainathan, S., y Spiess, J. (2017). Machine learning: an applied econometric approach. *Journal of Economic Perspectives*, 31(2), 87-106. <https://doi.org/10.1257/jep.31.2.87>
- Rosen, S. (1974). Hedonic prices and implicit markets: product differentiation in pure competition. *Journal of Political Economy*, 82(1), 34-55. <https://doi.org/10.1086/260169>
- Sirmans, G., Macpherson, D., y Zietz, E. (2005). The composition of hedonic pricing models. *Journal of Real Estate Literature*, 13(1), 3-43.

Metodología para estimar emisiones de GEI y consumo de agua en obras civiles del sector oil & gas en Colombia

Methodology for estimating GHG emissions and water consumption in civil engineering projects in the oil & gas sector in Colombia

YESID ALBERTO BELTRÁN-PÉREZ¹ - CAMILO ANDRÉS PERDOMO-HORTA² - NANCY TORRES-CASTELLANOS³

1. Magíster en Ingeniería Civil. Universidad escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. yecid.beltran-p@mail.escuelaing.edu.co, <https://orcid.org/0009-0006-7544-5866>

2. PhD. Ing. Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. camilo.perdomo-h@escuelaing.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-1413-888X>

3. PhD. Ingeniera Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. nancy.torres@escuelaing.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-3293-5444>

Recibido: 02/11/2025 Aceptado: 15/11/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se presenta una metodología estandarizada para estimar las emisiones de CO₂ y el consumo de agua en proyectos de construcción del sector oil & gas en Colombia. La propuesta integra directrices del IPCC y el Protocolo de Kioto, incorporando principios de sostenibilidad y economía circular. A partir de la definición de actividades constructivas, medios de transporte y factores internacionales de emisión y consumo hídrico, se cuantifican en forma trazable las variables ambientales. La metodología se consolida en una herramienta práctica de cálculo en hojas de Excel, aplicada a un caso de estudio de diseño de contrapozo. Los resultados evidencian reducciones de hasta 19 % en emisiones de CO₂ y optimización del consumo hídrico mediante alternativas sostenibles, demostrando que la inclusión de criterios ambientales en etapas de diseño mejora la toma de decisiones en obras civiles del sector.

Palabras claves: gases de efecto invernadero (GEI), IPCC, Protocolo de Kioto, huella hídrica.

Abstract

This paper presents a standardized methodology for estimating CO₂ emissions and water consumption in Oil & Gas construction projects in Colombia. The approach integrates IPCC and Kyoto Protocol guidelines, combining sustainability and circular economy principles. Based on the definition of construction activities, transportation routes, and internationally recognized emission and water consumption factors, environmental variables are quantified in a traceable manner. The methodology is implemented through a practical spreadsheet tool and applied to a counterwell design case study. Results indicate a reduction of up to 19 % in CO₂ emissions and better water use when sustainable options are used. This emphasizes the need to include environmental factors early in the design process to enhance decision-making in construction projects.

Keywords: greenhouse gases (GHG), IPCC, Kyoto, Protocol, water footprint.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos ambientales y socioeconómicos actuales, con efectos directos sobre la calidad del aire, el suelo y la disponibilidad hídrica, lo que impacta la sostenibilidad de los sistemas productivos (IPCC, 2019). La mitigación de estos impactos exige estrategias basadas en eficiencia energética e infraestructuras verde y azul, en las que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente el dióxido de carbono (CO_2), representan el factor más determinante del calentamiento global (Ingei, 2025).

El sector de la construcción es responsable de una parte significativa de las emisiones globales y del consumo de agua dulce, equivalentes a 14.144 MtCO_2 en 2024, con incrementos del 5 % entre 2020 y 2024 (PNUMA; GlobalABC, 2025). Las industrias de acero y concreto aportan el 10 % y 8 %, respectivamente (World Steel Association, 2025). En Colombia, el sector de la construcción emitió 100,90 MtCO_2 en 2023, que representan entre el 7 y 9 % de las emisiones nacionales, distribuidas en materiales (60 %), operación (30 %) y transporte (10 %) (CCCS et al., 2022). Particularmente, en el segmento de oil & gas (O&G) existe una limitada disponibilidad de información sistematizada, lo que restringe la capacidad de las empresas para reportar y gestionar sus impactos ambientales de manera trazable. Contribuye con el 5 % de las emisiones del sector energético, mostrando una tendencia creciente asociada al desarrollo de infraestructura para exploración y transporte (ACP, 2004).

Ante esta brecha, en el presente artículo se propone una metodología práctica y verificable para estimar las emisiones de GEI y el consumo hídrico en obras civiles del sector O&G en Colombia. La propuesta integra directrices internacionales (IPCC, Protocolo de Kioto) y fuentes nacionales, consolidándose en una herramienta de cálculo que facilita la cuantificación y comparación de alternativas constructivas.

El objetivo principal es proporcionar un marco metodológico estandarizado que permita incorporar criterios ambientales en las etapas de diseño y planeación de proyectos civiles del sector O&G, así como contribuir al cumplimiento de compromisos internacionales y a la toma de decisiones sostenibles.

Es importante precisar que los cálculos hechos en esta investigación se enfocan en dos variables técnicas específicas:

- **Emisiones de CO_2 .** Expresadas en toneladas de dióxido de carbono equivalente, derivadas de la combustión de combustibles fósiles, la producción de materiales y la operación de equipos. Estos cálculos se basan en factores de emisión reconocidos internacionalmente (IPCC, UPME, entre otros) y constituyen un insumo esencial para dar cumplimiento a compromisos internacionales como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París.
- **Consumo de agua.** Expresado en metros cúbicos, asociado al uso directo de agua en procesos constructivos como mezclado de concreto, perforación, limpieza y transporte. La estimación se fundamenta en datos reportados por sistemas nacionales como el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) y en bibliografía técnica especializada incluida en el presente documento.

Teniendo en cuenta este contexto, se propone una metodología práctica para estimar emisiones de GEI y consumo hídrico en obras civiles del sector oil & gas, integrable en reportes estandarizados y alineada con compromisos internacionales de mitigación. En este orden de ideas, se busca cerrar la brecha existente en la estimación integrada de emisiones de GEI y consumo hídrico en el sector oil & gas en Colombia, mediante el desarrollo de una metodología trazable, replicable y aplicable a procesos reales de diseño y construcción. A diferencia de enfoques tradicionales, esta propuesta permite la evaluación simultánea de variables ambientales claves, facilitando la toma de decisiones sostenibles desde etapas tempranas del proyecto.

REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA (ESTADO DEL ARTE)

El sector de la construcción consume aproximadamente el 30 % del agua dulce global (PNUMA; GlobalABC, 2025). No obstante, en investigaciones con enfoques más restringidos se reportan valores cercanos al 16 % (León Flórez y Ruiz Báez, 2022), lo que refleja la variabilidad metodológica y la necesidad de estandarizar métricas de consumo hídrico. En este sentido, la construcción sostenible emerge como una alternativa eficaz, capaz de reducir hasta en un 50 % el consumo de agua y en un 35 % las emisiones de dióxido de carbono (León Flórez y Ruiz Báez, 2022).

Esta reducción se consigue por medio de la implementación de sistemas de reutilización de aguas lluvias y grises para actividades no domésticas, así como mediante el uso de tecnologías eficientes en edificaciones.

En varios proyectos internacionales se ha demostrado la viabilidad técnica y económica de estas prácticas, aun cuando en Colombia su adopción todavía es limitada. El Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) reporta que cerca del 45 % de las edificaciones nuevas incluyen sistemas de ahorro de agua, pero la integración de energías alternativas continúa siendo marginal (CCCS et al., 2022). En el sector de hidrocarburos, certificaciones como LEED y CASA Colombia ofrecen marcos de referencia para la eficiencia hídrica y energética, mientras que la economía circular aporta lineamientos para la gestión de residuos y el tratamiento de aguas residuales.

En el sector de hidrocarburos (O&G), estas estrategias se pueden adaptar a instalaciones industriales mediante certificaciones como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) y CASA Colombia, que promueven la eficiencia tanto hídrica como energética y la trazabilidad ambiental. Además, la economía circular ofrece un marco para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD), e incluye el tratamiento de agua residual, lo cual resulta especialmente relevante en proyectos de infraestructura industrial (Sarasti y Yáñez, 2019).

Por otro lado, en la Guía CAR para el cálculo de huella de carbono municipal se propone una metodología basada en el IPCC (2006) y el Global Protocol for Community Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC, 2014), que permite estimar emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por sector. Esta herramienta ayuda a clasificar las emisiones en alcances 1, 2 y 3, considerando fuentes como combustibles fósiles, electricidad, procesos industriales, refrigerantes y lubricantes. Para el sector O&G, esta guía resulta útil en la planificación y operación de plantas, al permitir estimaciones detalladas de emisiones por transporte, residuos y consumo energético (Fong et al., 2014).

Complementariamente, en la Guía CIAT (2021) se establecen criterios para certificar reducciones de GEI en proyectos de hidrocarburos, y se definen tres tipos de intervención: recuperación de gas asociado, reducción de fugas físicas mediante tecnologías LDAR (*Leak*

Detection and Repair) avanzadas y mejora de eficiencia en sistemas de quema de gas (teas).

En la metodología se incluyen fórmulas para cuantificar reducciones en niveles 2 y 3, criterios de adicionalidad, línea base y monitoreo riguroso mediante técnicas como cromatografía, sensores y bolsas calibradas. Este enfoque es aplicable a proyectos de infraestructura que involucren compresión, transporte y tratamiento de gas, en los que la trazabilidad y verificación de resultados son fundamentales (CIAT, 2021).

Finalmente, el Acuerdo de París establece un marco internacional para enfrentar el cambio climático, promoviendo metas de mitigación, adaptación, financiamiento y transparencia. Colombia, como país firmante, se compromete a reducir el 20 % de sus emisiones proyectadas al año 2030, con posibilidad de alcanzar el 30 % mediante cooperación internacional. La implementación nacional exige que los planes de desarrollo territorial e infraestructura incorporen criterios climáticos, sobre todo en sectores vulnerables como el energético e industrial.

La escasez hídrica derivada del cambio climático afecta directamente la operación de hidroeléctricas y procesos industriales, entre estos los del sector O&G, lo que refuerza la necesidad de adoptar medidas como la gestión de metano en yacimientos, captura y almacenamiento de carbono, sustitución de carbón por biomasa y eficiencia energética en procesos industriales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

El estado del arte revisado aporta metodologías y referentes normativos que se implementaron en la investigación, particularmente en la integración de prácticas de construcción sostenible y guías de cálculo de huella de carbono e hídrica. Estos insumos fueron útiles para estructurar matrices verificables y para garantizar la trazabilidad de los resultados en proyectos industriales del sector O&G.

En la revisión se evidencian avances significativos en metodologías de cálculo de huella de carbono e hídrica, así como en prácticas de construcción sostenible; sin embargo, persisten vacíos relevantes:

- La falta de metodologías integradas que combinen simultáneamente emisiones de carbono y consumo de agua.
- La escasa adaptación de estudios internacionales al contexto colombiano.

- La limitada trazabilidad en sistemas de monitoreo aplicados al sector oil & gas.

Con este artículo se busca llenar dichos vacíos mediante el desarrollo de una herramienta práctica y verificable que permita estimar en conjunto las emisiones de GEI y el consumo hídrico en obras civiles del sector O&G en Colombia, contribuyendo a la toma de decisiones sostenibles y al cumplimiento de compromisos internacionales.

En síntesis, la investigación no se nutre solamente del estado del arte, sino que lo supera al proponer soluciones técnicas contextualizadas y verificables para la sostenibilidad en el sector O&G colombiano.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta se organiza en cuatro fases principales que permiten estimar de manera trazable las emisiones de GEI (alcance 3) y el consumo hídrico en proyectos civiles del sector oil & gas:

Estimación de GEI alcance 3 mediante factores de emisión para materiales, transporte y maquinaria

Se identifican las actividades constructivas relevantes (excavación, concreto, acero, transporte, maquinaria) y se cuantifican en términos de volumen, masa o unidades de obra.

Estimación de emisiones de GEI

Las emisiones de CO₂ equivalente calculadas con esta metodología corresponden a un alcance 3, que significa emisiones que se derivan de las emisiones indirectas, tanto las que se generan aguas arriba para que la empresa pueda llevar a cabo sus operaciones, a partir de la utilización y el reciclado de sus operaciones. Aun cuando son el resultado de las operaciones de la empresa, provienen de fuentes que no son de su propiedad ni están controladas por esta. En la mayoría de las ocasiones, sobre todo en el entorno industrial, el alcance 3 es donde se acumula gran parte de las emisiones (Greenhouse Gas Protocol, 2024). Las emisiones de GEI, para cada actividad determinada, se estiman utilizando la ecuación 1, mientras que las cantidades de CO₂ equivalente se calculan de acuerdo con la ecuación 2.

$$\text{Emisiones de GEI} = \text{Datos actividad} \times \text{Factor de emisión} \quad (1)$$

Donde:

- Datos de actividad = cantidad de material, volumen excavado o tiempo de operación.
- Factor de emisión = coeficiente de CO₂e por unidad de actividad (kg CO₂e/m³, kg CO₂e/kg, etc.).

$$\text{CO}_2\text{e} = \text{Emisiones GEI} \times \text{Potencial de calentamiento global} \quad (2)$$

Donde el potencial de calentamiento global se toma como 1,0 para CO₂.

En la ecuación 1, el término “Datos actividad” representa la cantidad de recursos, materiales o equipos invertidos en la ejecución de una actividad constructiva específica. En la ecuación 2, CO₂eq representa la cantidad de CO₂ equivalente producido por una actividad particular. El factor de emisión y el potencial de calentamiento global mostrados en las ecuaciones 1 y 2 se discuten más adelante.

Dado que la metodología propuesta en este artículo es de alcance 3, las emisiones de CO₂eq consideran emisiones producidas por los medios de transporte requeridos por las actividades y la maquinaria empleada. En esta investigación, el primer aspecto se consideró mediante la definición de diferentes rutas típicas de transporte de materiales, como concretos, aceros y los más comunes empleados en el sector O&G; el segundo aspecto se tomó en cuenta por medio de la consideración de un rendimiento para cada máquina requerida y sus emisiones equivalentes fueron los rendimientos por hora trabajada o los consumos de energía por hora laborada. Estos aspectos están considerados directamente en el factor de emisión contenido en la ecuación 1, como se muestra en la ecuación 3.

$$\text{Emisiones de GEI} = \text{Datos actividad} \times \text{Factor de emisión} + \text{Factor de emisión de maquinaria} \times \text{Rendimiento/h} \quad (3)$$

Estimación de consumo de agua

En cuanto al consumo de agua, que también se desagrega por actividades para los propósitos de esta investigación, se estima por medio de la ecuación 4.

$$\text{Consumo de agua} = \frac{\text{Cantidad de producto}}{\text{Factor de agua consumida}} \quad (4)$$

Donde:

- *Cantidad de producto* = volumen de concreto, perforación o limpieza.
- *Factor de agua consumida* = coeficiente en m³ por unidad de actividad.

En la ecuación 4, la cantidad de producto corresponde, esencialmente, a los datos de actividad en la ecuación 1, mientras que el factor de agua consumida se discute, también, más adelante en este artículo.

Integración en herramienta de cálculo

Los factores de emisión y consumo se incorporan en una hoja de cálculo que permite ingresar datos de obra y rutas de transporte. La herramienta genera automáticamente las estimaciones de CO₂eq y consumo hídrico, facilitando la comparación entre alternativas constructivas.

Posteriormente, se aplicó a un caso de estudio correspondiente a un contrapozo en construcción convencional, y se hizo una comparación entre dos opciones sostenibles (contrapozo metálico y concreto de bajas emisiones).

Factores de emisión por materiales

Los factores de emisión por materiales corresponden a unidades de masa, y se adoptaron de acuerdo con los coeficientes reportados por el IPCC (2019).

Factores de emisión por transporte

Los factores de emisión por transporte corresponden a los kg de CO₂eq/tkm por material transportado. Se definieron diferentes medios de transporte: transporte terrestre, marítimo, aéreo y férreo. Además, las rutas consideradas corresponden a rutas típicas que se implementan para el transporte de materiales en proyectos O&G en el país, y se consideraron transportes de materiales por vía aérea, como aceros y aditivos especiales. Las emisiones para cada medio de transporte se obtuvieron implementando coeficientes establecidos por el IPCC (2019) para los factores de emisión, y a partir de

distancias reales medidas con la ayuda de *software* como My Maps de Google, el cual genera archivos tipo .kmz con la longitud de cada tramo.

Factores de emisión por maquinaria

Para aquellas actividades que requieren que alguna maquinaria esté presente para su fabricación o ejecución, se consideraron factores de emisión por maquinaria que corresponden a los rendimientos por hora de cada maquinaria y equipo. Estos valores se estiman a partir de factores de emisión establecidos por el IPCC (2019) y los rendimientos de la máquina específica, adoptados según lo reportado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España (Miteco, 2024) (por ejemplo, bulldózer potencia mínima 120 hp – Factor de emisión 1,97 m³/CO₂eq y rendimiento de 62,42 m³/h, lo que da un factor de emisión de 0,12 t/CO₂eq por los 62,42 m³/h), y tienen en cuenta una emisión equivalente unitaria que depende de condiciones de operación, tipo de terreno o actividad que se va a realizar. Con la actividad definida (por ejemplo, cantidad de un material), se pueden estimar las emisiones producidas por su ejecución con el rendimiento de la(s) máquina(s) necesitada(s) y su factor de emisión propio. Los rendimientos de las máquinas y los factores de emisión propios de ellas se obtuvieron de fuentes como el IPCC (2019) y Miteco (2024).

Potencial de calentamiento global

El potencial de calentamiento global corresponde a un indicador comparativo que mide cuánto contribuye un gas de efecto invernadero al calentamiento de la atmósfera en relación con el dióxido de carbono (CO₂), durante un periodo de tiempo determinado.

Estos gases se abordan especialmente en emisiones de alcance 2, por lo que para esta fase del proyecto de investigación no se incluyeron en los cálculos, y el potencial de calentamiento global en la ecuación 2 se tomó con un valor de 1,0 en todos los casos.

Factores de consumo de agua

Los factores de consumo de agua representan el gasto promedio de unidad de volumen (m³). Con una actividad definida, se le puede asociar un factor de consumo de

agua específico, determinando así su consumo total. Para los propósitos de esta investigación, se obtuvieron los factores de consumo de agua (Mora González, 2023). A continuación, se detallan los criterios asociados a los factores de emisión de consumo de agua.

Criterios de selección de factores de emisión y consumo hídrico

Los factores de emisión y consumo de agua se seleccionaron con base en los siguientes criterios:

- **Reconocimiento internacional.** Se priorizaron factores provenientes de organismos como el IPCC (2019) y Miteco (2024), y los que se han podido consultar (Mora González, 2023).
- **Pertinencia sectorial.** Se seleccionaron factores aplicables al sector de la construcción y al contexto de proyectos oil & gas.
- **Consistencia metodológica.** Se emplearon factores compatibles en unidades y estructura para su integración en el modelo.
- **Adaptabilidad al contexto colombiano.** En ausencia de factores locales, se utilizaron valores internacionales ajustados mediante supuestos operativos.

Estos criterios garantizan la comparabilidad de los resultados y la coherencia metodológica del estudio.

Implementación de la metodología

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de esta investigación es la estimación de las cantidades de CO₂eq y consumo de agua en obras de ingeniería civil del sector O&G en Colombia; en consecuencia, se seleccionaron las actividades típicas en que se consideró que se puede desagregar un proyecto típico del sector, y resultaron 87 en total. Estas abarcan materiales como concretos, aceros, suelos de mejoramiento, aditivos y misceláneos (por ejemplo, cables y conectores).

La descripción detallada de cada una de las actividades con sus factores de emisión en la fuente, factores de emisión por transporte, factores de emisión por maquinaria y factores de consumo de agua, se puede encontrar en Beltrán Pérez (2025).

Herramienta de cálculo

Con el propósito de facilitar la estimación de emisiones de CO₂ equivalente y consumo de agua en proyectos civiles del sector oil & gas, la metodología se implementó en una herramienta práctica desarrollada en hojas de cálculo de Excel. La herramienta permite ingresar de manera sencilla las cantidades de obra y las rutas de transporte definidas para cada proyecto. Con base en estos datos, calcula automáticamente las emisiones y el consumo hídrico, integrando los factores previamente establecidos para materiales, transporte y maquinaria.

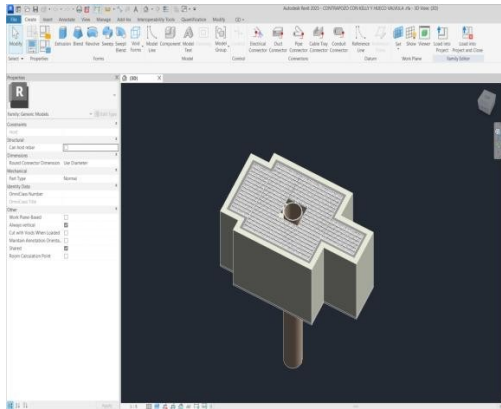
Su principal valor radica en la aplicabilidad directa en proyectos reales, ya que ofrece resultados transparentes y comparables entre alternativas constructivas. Esto convierte a la herramienta en un apoyo concreto para la planeación y el diseño, al permitir incorporar criterios ambientales en la toma de decisiones desde etapas tempranas.

En este artículo, la herramienta se aplica a un caso de estudio representativo, cuyos resultados se presentan y analizan en la siguiente sección.

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio corresponde a un contrapozo (*cellar*), estructura típica en proyectos de perforación del sector oil & gas. Se trata de una excavación revestida con acero o concreto, ubicada bajo el equipo de perforación, cuya función principal es alojar y proteger elementos críticos como el cabezal del pozo y los preventores de reventones (BOP). Esta obra constituye un componente esencial para la seguridad y operación inicial de los pozos petroleros. A renglón seguido, se presenta la geometría general del contrapozo convencional en concreto (figura 1 y tabla 1).

Figura 1.
Contrapozo
convencional en
concreto.
Fuente: Elaboración propia.



- Cantidad de material: 6,39 m³
- Factor de emisión en fuente: $(0,138 \times 2813,92) = 387,92 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$
- Distancia de transporte: 752 km (Bogotá-Putumayo)
- Factor de transporte: 0,11626 kg CO₂e/t·km (transporte terrestre)

Las emisiones se calculan así:

Emisiones en fuente:

$$6,39 \text{ m}^3 \times 387,92 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 + 752 \text{ km} \times 0,11626 = 2566,24 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Se presenta a continuación un ejemplo simplificado de trazabilidad del cálculo para una actividad específica del caso de estudio, con el propósito de garantizar la claridad y reproducibilidad de la metodología

Las actividades y rutas de transporte para el caso de estudio se implementaron en la herramienta de cálculo propuesta, en tanto que las actividades contempladas y sus correspondientes cantidades de obra se pueden ver más adelante (tabla 1), al igual que las rutas de transporte (figura 2).

Ejemplo de trazabilidad del cálculo

Para la actividad “concreto clase D (210 kg/cm²)”, se tienen los siguientes datos (tomados de las tablas 1, 2 y 4):

Finalmente, la suma de los componentes permite obtener el valor total de emisiones para la actividad. Este procedimiento se repite para cada una de las actividades incluidas en la herramienta, garantizando trazabilidad completa desde los datos de entrada hasta los resultados finales.

Los factores de emisión y los factores de consumo de agua correspondientes a las actividades descritas en la tabla 1 (consignados en la herramienta generada) se muestran a continuación (tablas 2 y 3). Con esta información (tablas 1 a 3), es posible implementar las ecuaciones 1, 3 y 4 para cada una de las actividades consideradas para el contrapozo del caso de estudio; los resultados de estos cálculos se presentan más adelante (tabla 4).

Tabla 1
Cantidad de materiales para contrapozo

Contrapozo en concreto convencional			
Material	Unidad de medida	Cantidad	Peso (kg)
Excavación mecánica en material común (incluye transporte a una distancia ≤ a 1 km)	m ³	56,08	1700.00
Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi)	m ³	6.39	2813.92
Concreto clase H (105 kg/cm ² o 1500 psi)	m ³	0,29	2645,00
Junta de construcción con cinta PVC 15	m	11,60	0,80
Acero fy: 60.000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	31,82	1,00
Malla electrosoldada fy: 60.000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	355,13	1,00
Suministro e instalación de estructura metálica	kg	507,83	1,00
Junta impermeabilizada	m	11,60	0,80
Suministro e instalación de tubo conductor de ø12" a ø20" (incluye suministro y transporte)	m	6,00	1,00

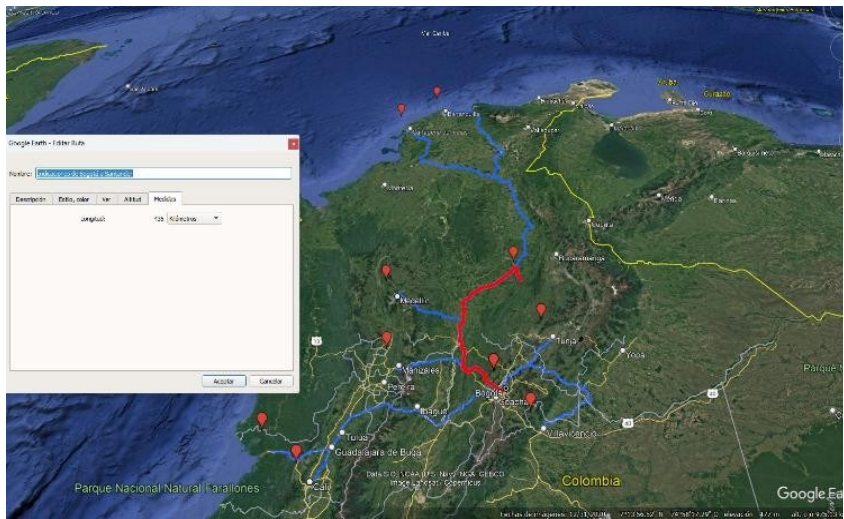


Figura 3. Rutas analizadas en la herramienta

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Google Earth y My Maps.

Tabla 2
Factores de emisión para actividades (caso de estudio)

001	Proyecto	Materiales /equipos	Unidad	Cantidad	Factor de emisión CO ₂ en la fuente (kg CO ₂ e)	Distancia	Origen	Destino	Tipo de transporte	Factor CO ₂ -t/km	Tipo de fuente
001	Campo Rubiales	Excavación mecánica en material común, incluye transporte a una distancia ≤ a 1 km	m ³	56,08	10,71	752	Bogotá	Putumayo: Mocoa	TT001	0,11626	MP
001	Campo Rubiales	Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi) preparado con cemento verde.	m ³	6,39	387,92	752	Bogotá	Putumayo: Mocoa	TT001	0,11626	S
001	Campo Rubiales	Concreto clase E (175 kg/cm ² o 2500 psi) preparado con cemento verde.	m ³	0,29	359,61	752	Bogotá	Putumayo: Mocoa	TT001	0,11626	M
001	Campo Rubiales	Junta de construcción con cinta PVC 15	m	11,60	2,56	752	Bogotá	Putumayo: Mocoa	TT001	0,11626	MP
001	Campo Rubiales	Acero fy: 60000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	31,82	1,20	841	Estados Unidos Los Ángeles	Buenaventura	TT003	0,602	MP
001	Campo Rubiales	Malla electrosoldada fy: 60000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	355,13	1,20	841	Estados Unidos Los Ángeles	Buenaventura	TT003	0,602	MP
001	Campo Rubiales	Suministro e Instalación de estructura metálica para misceláneos.	kg	504,73	1,20	841	Estados Unidos Los Ángeles	Buenaventura	TT003	0,602	S
001	Campo Rubiales	Junta impermeabilizada	m	11,60	2,56	752	Bogotá	Putumayo: Mocoa	TT001	0,11626	S
	Campo Rubiales	Suministro e Instalación de tubo conductor de ø12" a ø20" (incluye suministro y transporte).	kg	6,00	0,10	841	Estados Unidos Los Ángeles	Buenaventura	TT003	0,602	S

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3
Factores de consumo de agua para actividades del caso de estudio

ID	Consumo de agua						Referencias
	Ítem	Unidad	Cantidad	Factor de huella hídrica azul	Cantidad 2	Total	
1	Grouting cementoso	m ³	1	1,50	9,37	14,06	WFN / Pavco (2025)
2	Grouting epóxido	m ³	1	1,97	1,84	3,62	WFN / Pavco (2025)
3	Junta de construcción con cinta PVC 22	m	1	0,34	11,69	3,98	WFN / Pavco (2025)
4	Junta de construcción con cinta PVC 15	m	1	0,34	11,69	3,98	WFN / Pavco (2025)
5	Junta de dilatación	m	1	0,34	11,69	3,98	WFN / Pavco (2025)
6	Junta impermeabilizada	m	1	0,34	11,69	3,98	WFN / Pavco (2025)
7	Concreto clase H (105 kg/cm ² o 1500 psi)	m ³	1	6,33	16,00	101,28	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
8	Concreto clase F (140 kg/cm ² o 2000 psi)	m ³	1	6,33	17,00	107,61	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
9	Concreto clase E (175 kg/cm ² o 2500 psi)	m ³	1	6,33	22,40	141,79	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
10	Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi)	m ³	1	6,33	22,60	143,06	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
11	Concreto clase C (280 kg/cm ² o 4000 psi)	m ³	1	6,33	24,80	156,98	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
12	Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi), preparado con cemento verde.	m ³	1	6,03	22,60	136,28	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
13	Concreto clase E (175 kg/cm ² o 2500 psi) preparado con cemento verde.	m ³	1	6,03	22,40	135,07	Mora-González & Cruz-Zúñiga (2024)
14	Concreto clase E con mineral rojo (175 kg/cm ² o 2500 psi)	m ³	1	6,03	22,40	135,07	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
15	Demolición manual de concreto	m ³	1	6,00	1,00	6,00	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4
Cálculo de CO₂eq y consumo de agua para actividades del contrapozo del caso de estudio

Código del proyecto	Proyecto	Ítem	Unidad	Cantidad	Emisiones (kg CO ₂ e)	Emisiones (t CO ₂ e)	Consumo de agua (m ³)
001	Campo Rubiales	Excavación mecánica en material común, incluye transporte a una distancia ≤ a 1 km	m ³	56,08	796	0,796	191
001	Campo Rubiales	Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi) preparado con cemento verde	m ³	6,39	2615	2,615	871
001	Campo Rubiales	Concreto clase E (175 kg/cm ² o 2500 psi) preparado con cemento verde	m ³	0,29	1265	1,265	39
001	Campo Rubiales	Junta de construcción con cinta pvc 15	m	11,6	194	0,194	46
001	Campo Rubiales	Acero fy: 60000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	31,82	572	0,572	3278
001	Campo Rubiales	Malla electrosoldada fy: 60.000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	355,13	935	0,935	3661
001	Campo Rubiales	Suministro e instalación estructura metálica para misceláneos	kg	504,73	605,676	0,605676	49999
001	Campo Rubiales	Junta impermeabilizada	m	11,6	29,7482	0,0297482	46
001	Campo Rubiales	Suministro e instalación tubo conductor de ø12" a ø20" (incluye suministro y transporte)	kg	6	297,988	0,297988	203
				Totales	7211	7,211	58334

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de alternativas

Los resultados presentados en la sección anterior se toman como línea base para el proyecto, debido a que es una construcción con materiales y procesos constructivos convencionales.

Para evaluar qué impacto puede tener la consideración de las nuevas variables de evaluación propuestas en esta investigación (por ejemplo, emisiones de CO₂ eq y consumo de Agua) en la toma de decisiones en la ejecución de proyectos del sector O&G, se repite el mismo ejercicio realizado en la sección anterior, pero para estructuras de contrapozo con diferencias geométricas y en materiales alternativos, como se muestra a continuación. Allí aparece un *cellar* en estructura metálica recubierto por concreto en un espesor menor que garantiza la estanqueidad de la estructura, que también corresponde a la alternativa 1 (figura 3). Se tomó en cuenta una alternativa 2, que corresponde (geométricamente) a la misma estructura mostrada con anterioridad (figura 1), pero el tipo de concreto considerado para la construcción se genera utilizando cemento de bajas emisiones de CO₂, en cambio del cemento con clínker tradicional.

Las actividades y cantidades de materiales requeridos para las alternativas 1 y 2 se muestran a renglón seguido (tablas 5 y 6).



Figura 3. Contrapozo convencional en concreto
Fuente: Elaboración propia.

Los factores de emisión y los factores de consumo de agua se recuperan (por ejemplo, están directamente incorporados en la herramienta generada) de las bases de datos construidas, en forma análoga a lo mostrado anteriormente (tablas 2 y 3). Las emisiones y consumos de agua por cada actividad, al igual que las emisiones y consumo totales para cada actividad, se estiman de la misma manera que para la línea base. Los resultados se resumen a continuación (tabla 7 y figura 4).

Tabla 5
Cantidades de obra para la alternativa 1 del contrapozo

Contrapozo metálico			
Material	Unidad de medida	Cantidad	Peso (kg)
Excavación mecánica en material común (incluye transporte a una distancia ≤ a 1 km)	m ³	13,76	1700,00
Concreto clase d (210 kg/cm ² o 3000 psi)	m ³	2,44	2813,92
Concreto clase H (105 kg/cm ² o 1500 psi)	m ³	0,29	2645,00
Acero fy: 60000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	323,40	1,00
Suministro e instalación de perfilería ASTM a36 (columnas, vigas, entrepisos, casetas, etc.)	kg	150,48	1,00
Suministro e instalación de estructura metálica para misceláneos	kg	621,25	1,00
Suministro e instalación de tubo conductor de ø12" a ø20" (incluye suministro y transporte)	m	7,00	1,00
Suministro e instalación de tubería en lámina metálica corrugada MP 152 galvanizada, fabricada bajo la norma ASTM a761, para cellar foso de perforación, calibre 8 hasta calibre 12	kg	682,00	1,00
Suministro e instalación de tubería en lámina metálica corrugada MP 152 galvanizada, fabricada bajo la norma ASTM a761, para cellar foso de perforación, calibre 2 hasta calibre 6	kg	280,50	1,00
Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi)	m ³	1,40	2813,92

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6
Cantidades de obra para la alternativa 2 del contrapozo

Contrapozo en concreto en bajas emisiones			
Material	Unidad de medida	Cantidad	Peso (kg)
Excavación mecánica en material común (incluye transporte a una distancia $\leq$ a 1 km)	m ³	56,08	1,00
Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi) preparado con cemento verde	m ³	6,39	1,00
Concreto clase E (175 kg/cm² ó 2500 psi) preparado con cemento verde	m ³	0,29	1,00
Junta de construcción con cinta PVC 15	m	11,60	1,00
Acero fy: 60.000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	31,82	1,00
Malla electrosoldada fy: 60.000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	355,13	3504,00
Suministro e instalación estructura metálica para misceláneos	kg	507,83	0,05
Junta impermeabilizada	m	11,60	1,00
Suministro e instalación de tubo conductor de Ø12" a Ø20" (incluye suministro y transporte)	m	6,00	1,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7
Consolidado de emisiones de CO₂eq y consumo de agua para alternativas a la línea base

Escenario	Emisiones de CO ₂	Consumo de agua (m ³)
Línea base	8295	61.687
Alternativa 1 (contrapozo metálico)	8797	121.079
Alternativa 2 (contrapozo en concreto de bajas emisiones)	7211	58.334

Comparación de alternativas

La alternativa del contrapozo metálico (alternativa 1) presenta ahorros en tiempos de construcción; sin embargo, incrementa el consumo de agua en comparación con la línea base y no representa una mejora en términos de reducción de GEI. Por el contrario, la alternativa 2 (concreto con cemento de bajas emisiones) sí presenta reducciones significativas tanto en emisiones como en consumo hídrico, atribuibles a la incorporación de tecnologías limpias y métodos constructivos optimizados.

La selección de alternativas se hace por medio de un gráfico tipo estrella, que integra siete indicadores de sostenibilidad con diferentes pesos relativos: a) eficiencia en tiempo (20 %); b) eficiencia en costos (15 %); c) facilidad de construcción (10 %); d) vida útil (10 %); e) necesidad de mantenimiento (10 %); f) económica circular (15 %), y, finalmente, g) descarbonización.

Esta forma de calificación busca llegar un criterio de decisión que evalúe de manera holística las ventajas y desventajas de cada alternativa propuesta. Los resultados para el caso de estudio y las alternativas presentadas en esta investigación se presentan en la figura anterior (figura 4).

Los resultados muestran que la alternativa 2, correspondiente al contrapozo en concreto verde, presenta el comportamiento más uniforme en todos los indicadores de decisión investigados, a pesar de no ser la alternativa

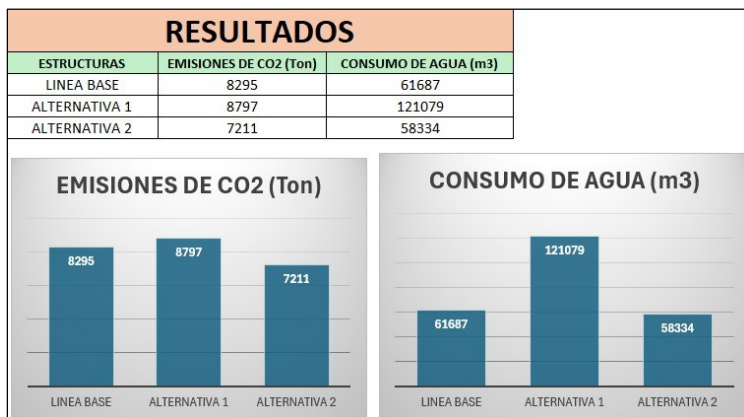


Figura 4. Emisiones de CO₂eq y consumo de agua total para el contrapozo del caso de estudio y sus alternativas

Fuente: Elaboración propia.

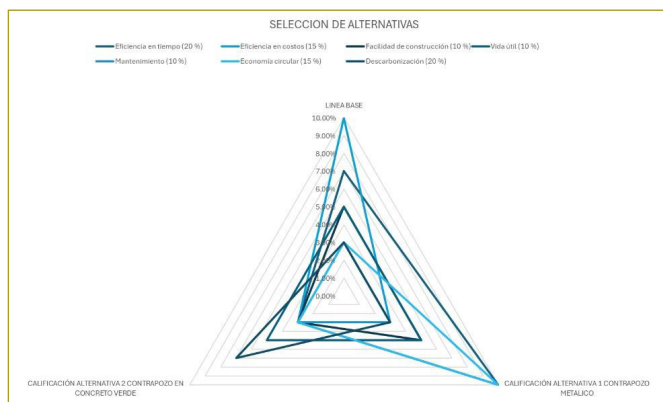


Figura 5. Diagrama de selección de alternativas y evaluación de indicadores

Fuente: Elaboración del autor.

más favorecida para un solo indicador, como sí lo es, por ejemplo, el contrapozo metálico para eficiencia en costos y facilidad de construcción.

Por un lado, la alternativa 2 presenta ahorros significativos en consumo de agua y reducción de emisiones de GEI, y por otro, que desde un punto de evaluación holístico la alternativa es competitiva, a pesar de no ser la más efectiva para un indicador de desempeño particular (figuras 4 y 5).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de evaluar la robustez de la metodología implementada en la herramienta de cálculo de huella de carbono y consumo hídrico, se efectuó un análisis de sensibilidad aplicando variaciones de $\pm 10\%$ en los factores de emisión de CO_2 equivalente y en los coeficientes de huella hídrica azules asociados a materiales y procesos constructivos. Los resultados muestran que las emisiones totales de GEI presentan fluctuaciones en el rango del 8 % al 12 %, dependiendo de la actividad predominante y las fuentes consultadas, con el concreto y el acero como materiales de mayor incidencia en dichas variaciones.

En el caso del consumo de agua, las desviaciones alcanzan hasta un 9 % del valor total estimado, lo que confirma que este indicador es igualmente sensible a la calidad y precisión de los factores empleados. Este comportamiento evidencia que la confiabilidad de los resultados depende directamente de la actualización, trazabilidad y pertinencia de las fuentes utilizadas (IPCC, WFN, Icontec, entre otras), reforzando la necesidad

de recurrir a bases de datos verificadas y bibliografía técnica reconocida para garantizar la validez del análisis ambiental en proyectos del sector oil & gas.

Los aspectos más destacados de la evaluación de alternativas después de la implementación de la metodología de cálculo propuesta al caso de estudio se pueden resumir de la siguiente manera:

- **Reducción de emisiones.** La alternativa en concreto de bajas emisiones logra una reducción del 19 %, mientras que la alternativa metálica presenta solo un incremento del 5 % con respecto a la línea base.
- **Optimización hídrica.** El acero es la opción más deficiente en consumo de agua. En contraste, la alternativa de concreto bajo en CO_2 también mejora significativamente frente a la línea base. La alternativa 1 registra un aumento del 96 % con respecto a la línea base, mientras que la alternativa 2 presenta una reducción de casi el 6 %.
- **Impacto en decisiones.** La aplicación de la metodología de estimación permitió identificar que, manteniendo la funcionalidad estructural, es posible reducir impactos ambientales mediante selección de materiales.
- **Curso de acción.** Para el caso de estudio, se recomienda priorizar el uso de concretos con menor huella de carbono, especialmente si la zona de construcción cuenta con restricciones hídricas.
- **Valor de la herramienta.** La herramienta desarrollada demostró ser útil para integrar criterios ambientales en decisiones de diseño, ya que permite cuantificar impactos y facilitar la trazabilidad en matrices comparativas.

Los resultados del caso de estudio, aunque acotados, apuntan en forma clara a la relevancia de considerar las emisiones de GEI y el consumo de agua como variables técnicas en la estructuración, planificación y diseño de obras civiles en el sector O&G. Es razonable esperar que, en proyectos de mayor envergadura o en análisis integrales de ciclo de vida, estas diferencias se amplíen y tengan un impacto más decisivo en la selección de alternativas.

Si bien la viabilidad técnica y la factibilidad económica seguirán siendo pilares fundamentales en la ejecución de proyectos, las nuevas variables introducidas por esta investigación (las emisiones de GEI y la huella hídrica)

deben comenzar a ocupar un lugar prioritario en la conciencia de los responsables técnicos, financieros y estratégicos a lo largo de la cadena de valor. Esto es especialmente relevante si se pretende cumplir con los compromisos sectoriales y nacionales de reducción de emisiones de CO₂ y uso eficiente del recurso hídrico.

Vale la pena anotar que la inclusión de criterios ambientales en el diseño puede modificar el curso de acción en proyectos del sector O&G. El impacto hídrico es dominante para el caso de estudio y sus alternativas, aun cuando las diferencias en emisiones son marginales, lo que resalta la necesidad de priorizar la eficiencia en el uso de agua, en particular si la zona de construcción es un área con estrés hídrico. Desde este punto de vista, la alternativa del contrapozo en concreto verde (alternativa 2) sería ampliamente favorecida, dado que no existen problemas técnicos con esta alternativa. Otros aspectos importantes, como el costo inicial de inversión y los posibles ahorros por la implementación de tecnología verde, entrarían a jugar en la selección de una alternativa final.

CONCLUSIONES

La investigación desarrolló una metodología estandarizada para estimar emisiones de CO₂ equivalente y consumo hídrico en obras civiles del sector oil & gas en Colombia, integrando factores asociados a materiales, transporte y maquinaria en una herramienta práctica de cálculo. Este enfoque permite la cuantificación trazable de impactos ambientales y facilita la comparación entre alternativas constructivas desde etapas tempranas de diseño.

Hay que reconocer las limitaciones inherentes al enfoque. La precisión de los resultados depende directamente de la calidad, representatividad y actualización de los datos de entrada, así como de la correcta selección de factores de emisión y huella hídrica provenientes de fuentes confiables, como el IPCC, la UPME y la bibliografía técnica especializada. El empleo de valores promedio y la simplificación de ciertos procesos pueden introducir sesgos o subestimar la variabilidad contextual, sobre todo en proyectos con condiciones geográficas, tecnológicas y operativas particulares.

La aplicación al caso de estudio evidenció reducciones de hasta un 19 % en emisiones de CO₂ y mejoras significativas en el consumo de agua al incorporar ma-

teriales de menor impacto ambiental, como concretos de bajas emisiones. Estos resultados demuestran que la inclusión de variables ambientales puede influir de un modo determinante en la selección de alternativas constructivas.

Si bien el caso de estudio se enmarca en el sector oil & gas, la metodología propuesta posee un carácter transversal y puede aplicarse a distintos tipos de estructuras civiles. Siempre que se disponga de información sobre cantidades de materiales, logística de transporte y factores de emisión e hídricos, es posible hacer estimaciones confiables en proyectos de diversa naturaleza, desde edificaciones urbanas hasta obras de infraestructura. Esta flexibilidad amplía el alcance de la herramienta y la posiciona como un insumo estratégico para la gestión ambiental y la toma de decisiones.

Hacia el futuro, se requiere avanzar en la integración dinámica de la metodología con bases de datos actualizadas y verificadas de factores de emisión y consumo de agua, con el fin de evitar su desactualización y mejorar la precisión de los resultados. Así mismo, se evidencia la necesidad de desarrollar factores ajustados al contexto colombiano, que reflejen las condiciones reales de los procesos constructivos y fortalezcan la validez de las estimaciones.

Por último, la aplicación de la metodología en otros contextos exige considerar la disponibilidad y calidad de los datos, la adecuación de los factores al entorno local y las condiciones logísticas específicas de cada proyecto, aspectos que resultan determinantes para garantizar la confiabilidad del análisis.

REFERENCIAS

- <https://acp.com.co/portal/aportes-a-la-descarbonizacion-hechos-de-sostenibilidad-del-sector-petroleo-y-gas-en-colombia/>
- Beltrán Pérez, Y. A. (2025). *Guía metodológica estandarizada y herramienta que permite medir, reportar y consultar en tiempo real la estimación de emisiones de GEI y consumo de agua en proyectos de construcción de obras civiles del sector oil & gas en Colombia* [trabajo de grado, Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito].
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (2021). *Guía para certificación de reducción de emisiones en hidrocarburos*. CIAT.
- Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, Hill y Universidad de los Andes (2022, 14 de mayo). *Línea base de las emisiones del sector de las edificaciones*. CCCS. <https://cccs.org.co/wp-content/uploads/2023/02/29.-linea-base-de-las-emisiones-de-sector-de-las-edificaciones.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2016). *Metodología de cálculo para la medición de huella de carbono*

- municipal CAEM*. Centro de Asistencia Técnica a la Industria Ambiental. <https://doi.org/10.1234/ra.2021.23.2.45> (doi.org in Bing).
<https://ghgprotocol.org/gpc>
- Greenhouse Gas Protocol (2024). *Protocolo de GEI: estándar para inventarios corporativos*. World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/protocolo_spanish.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: IPCC. Disponible en <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (ipcc-nggip.iges.or.jp in Bing).
- Ingei (2025). *Inventario nacional de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. https://pigccme.minenergia.gov.co/public/uploads/web_documentos/622bac681f8f1.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. IPCC. [nggip.iges.or.jp](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp) in Bing).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2019). *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. IPCC. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf
 actualizada/documentos-oficiales.
- Mora González, J. (2023). *Factores de consumo de agua en procesos constructivos*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co>. (repositorio.unal.edu.co in Bing)
- León Flórez, N. V., y Ruiz Báez, L. K. (2022). Construcción sostenible en Colombia: retos y oportunidades. *Revista Ingeniería y Sociedad*, 18(1), 33-49. <https://revistas.unal.edu.co>. (revistas.unal.edu.co in Bing).
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y GlobalABC (2025, 17 de marzo). *Las emisiones del sector de la construcción han dejado de crecer por primera vez desde 2020, según Naciones Unidas*. PNUMA. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/las-emisiones-del-sector-de-la-construccion-han-dejado>
<https://doi.org/10.5678/ria.2019.12.3.77>.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (s.f.). *Calculadora de emisiones*. UPME. https://app.upme.gov.co/calculadora_emisiones1/new/calculadora.html
- World Steel Association (2025). *Sustainability indicators report 2025*. <https://www.worldsteel.org>

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Alcance y política

La *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* tiene como propósito principal ser un canal de divulgación del conocimiento técnico y científico que contribuya al desarrollo del país. Buscamos publicar trabajos de alta calidad editorial y rigor académico, que aporten a la discusión y avance de todas las áreas de la ingeniería, con un enfoque crítico, propositivo e interdisciplinario.

En nuestra publicación se priorizan tres tipos de contribuciones que fortalecen su visibilidad y proyección en comunidades científicas nacionales e internacionales:

- **Artículo de investigación científica y tecnológica.** En esta clase de manuscritos se presentan, en forma detallada, resultados originales, derivados de proyectos de investigación. Se estructura habitualmente en cuatro secciones: introducción, metodología, resultados y conclusiones. En la introducción se plantea el problema, se contextualiza su importancia, se formulan los objetivos y se incluye una revisión del estado del arte. En la metodología se exponen el diseño del estudio, las técnicas empleadas y los criterios de validez. Los resultados muestran los hallazgos de manera clara, apoyados con frecuencia en tablas o figuras. Finalmente, en las conclusiones se interpretan los datos obtenidos y se discute su impacto, además de que se pueden incluir recomendaciones para futuras investigaciones. El contenido de estos artículos debe fundamentarse en información verificable, respetar principios éticos y estar correctamente referenciado. Su extensión aproximada va de 5.000 a 8.000 palabras.
- **Artículo de reflexión.** Es un documento que surge de un proceso investigativo o académico, en el cual el autor desarrolla un análisis crítico, interpretativo o propositivo sobre un tema en particular. Por medio de una postura argumentada, sustentada en fuentes teóricas y experiencias, se construye una visión personal pero rigurosa sobre el objeto de estudio. La estructura del artículo incluye una introducción clara, un desarrollo temático con enfoque reflexivo y una conclusión que sintetiza los aportes, reafirma la posición del autor y plantea posibles líneas de indagación. Su extensión sugerida está entre 3.000 y 6.000 palabras.
- **Artículo de revisión.** En este tipo de artículos se analizan sistemáticamente los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, con el propósito de identificar avances, debates, tendencias y vacíos en un campo particular de la ciencia o la tecnología. No se trata de una simple recopilación de fuentes, sino de una integración crítica que permita proponer nuevas perspectivas o rutas investigativas. Su estructura incluye introducción, criterios y métodos de búsqueda, análisis temático, discusión y conclusiones. Se exige una revisión bibliográfica exhaustiva y bien documentada, con una extensión entre 6.000 y 10.000 palabras.

Además de estas tres tipologías principales, la revista contempla otras formas de contribución académica, tales como las siguientes:

- **Artículo corto.** Comunica resultados preliminares o parciales de investigaciones en curso que, por su relevancia o novedad, requieren una difusión temprana. Es un documento breve (entre 2.000 y 3.000 palabras), de redacción precisa y estructura básica: introducción, metodología resumida, resultados y conclusiones iniciales.

- **Reporte de caso.** Presenta el análisis detallado de una situación, experiencia técnica o intervención metodológica particular, con el fin de compartir lecciones aprendidas y reflexiones aplicables a contextos similares. Es común en áreas aplicadas, como la ingeniería, la salud, la educación o la gestión pública. Incluye descripción del caso, análisis crítico y discusión de sus implicaciones.
- **Revisión de tema.** A diferencia de un artículo de revisión sistemática, en esta clase de textos se ofrece una mirada crítica y estructurada sobre un tema específico, sin pretender abarcar toda la bibliografía disponible. Se busca ordenar el conocimiento existente, resaltar perspectivas relevantes, identificar puntos de controversia y señalar rutas posibles de desarrollo. Se recomienda una estructura que incluya introducción, desarrollo temático y conclusiones.

La revista enfoca su labor editorial en la publicación de artículos de investigación, reflexión y revisión, por considerarlos los más relevantes para fortalecer el conocimiento en el campo de la ingeniería. Es una publicación de acceso abierto, con periodicidad cuatrimestral, y solo recibe manuscritos originales e inéditos.

Todos los textos enviados pasan por una evaluación rigurosa, hecha por pares académicos y por el Comité Editorial, con el objetivo de garantizar su calidad, pertinencia y contribución al desarrollo científico y tecnológico. Los artículos se deben ajustar a las normas de citación y referencias del *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association* (APA) (7ª ed.).

En el marco de esta nueva etapa editorial, los artículos se deben enviar exclusivamente a través de la plataforma Open Journal Systems (OJS), a la cual se puede acceder desde el sitio web oficial de la revista:

<https://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Para completar el proceso de envío, el autor o autora debe:

- Registrarse como usuario en la plataforma OJS.
- Diligenciar la información completa del manuscrito y los autores.
- Adjuntar el archivo del artículo en formato editable, conforme a las normas de presentación de la revista.
- Aceptar la declaración de originalidad y cesión de derechos.
- Verificar que todas las secciones del envío estén completas antes de finalizar el proceso.

Así mismo, el manuscrito debe tener las siguientes normas de presentación:

- Un máximo de 20 páginas, en formato Word, escrito a una columna, interlineado de 1.5, con fuente Georgia de 11 puntos.
- Las citas y referencias deben seguir las normas y lineamientos que aparecen en el *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association* (APA) (7ª ed.).
- Las gráficas y tablas deben ser editables. Se recomienda anexar los archivos originales y nombrarlos de manera clara (por ejemplo: Figura_1.xlsx, Tabla_2.docx), indicando el número correspondiente en el texto.

Para más información o consultas editoriales, se puede comunicar al correo monica.suarez@escuelaing.edu.co.

Scope and Policies

The main goal of *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* is to be a means to divulge technical and scientific knowledge which contributes to the development of the country. We seek to publish high-quality rigorous works which help discuss and advance in different fields of engineering with a critical, proactive, and interdisciplinary approach.

Our journal prioritizes three types of contributions to strengthen its visibility and projection in national and international scientific communities:

- **Scientific and technological research article.** This type of paper shows, in detail, original results derived from research projects. It is usually structured in four sections: introduction, methodology, results, and conclusions. The introduction states the problem, justifies its importance, sets up the objectives, and includes a literature review. The methodology shows the study design, the tools and techniques used, and validity criteria. The results show their findings in a straightforward way, usually supported tables, charts, and figures. Finally, the conclusions interpret the data obtained, discuss their impact, and may include suggestions for future research. This type of article must be grounded on verifiable information, respect ethical principles, and be appropriately cited and quoted. Their length oscillates between 5,000 and 8,000 words.
- **Reflection article.** This is a document resulting from a research or academic process in which the author develops a critical, interpretive, or propositional analysis on a particular topic. Through an argued stance, supported by theoretical sources and experiences, the author constructs a personal yet rigorous perspective on the subject. The article's structure includes a clear introduction, a thematic development with a reflective approach, and a conclusion that synthesizes key contributions, reaffirms the author's position, and suggests potential lines of inquiry. The suggested length is between 3,000 and 6,000 words.
- **Review article.** This type systematically compiles and analyzes published or unpublished research findings to identify advances, debates, trends, and gaps in a specific field of science or technology. It is not merely a compilation of sources but a critical integration that proposes new perspectives or research directions. Its structure includes an introduction, search criteria and methods, thematic analysis, discussion, and conclusions. A thorough and well-documented literature review is required, with a length between 6,000 and 10,000 words.

In addition to these three main types, the journal considers other forms of academic contributions, such as:

- **Short article.** Presents preliminary or partial results from ongoing research that, due to their relevance or novelty, require early dissemination. It is a concise document (2,000–3,000 words) with

precise writing and a basic structure: introduction, summarized methodology, results, and initial conclusions.

- **Case report.** It provides a detailed analysis of a specific situation, technical experience, or methodological intervention to share lessons learned and reflections applicable to similar contexts. Common in applied fields such as engineering, health, education, or public management. It includes a case description, critical analysis, and discussion of implications.
- **Topic review.** Unlike a systematic review article, this type offers a critical and structured examination of a specific topic without attempting to cover all available literature. It aims to organize existing knowledge, highlight relevant perspectives, identify points of controversy, and suggest development paths. The recommended structure includes an introduction, thematic development, and conclusions.

The journal focuses its editorial efforts on publishing research, reflection, and review articles, as they are considered the most relevant for advancing knowledge in the field of engineering. It is an open-access publication with a quarterly frequency and only accepts original, unpublished manuscripts.

All submitted texts undergo a rigorous peer-review process by academic peers and the Editorial Committee to ensure quality, relevance, and contribution to scientific and technological development. All articles must adhere to the citation and reference guidelines of APA style (7th edition).

As part of this new editorial phase, article submissions must be made exclusively through the Open Journal Systems (OJS) platform, accessible via the journal's official website:

<https://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

To complete the submission process, authors must:

- Register as a user on the OJS platform.
- Complete all manuscript and author information.
- Attach the article file in an editable format, following the journal's submission guidelines.
- Accept the originality statement and copyright transfer.
- Verify that all submission sections are complete before finalizing the process.

Manuscript formatting guidelines:

- The document must not exceed 20 pages, in Word format, single-column, 1.5 line spacing, with 11-point Georgia font.
- Citations and references must follow APA style (7th edition).
- Graphs and tables must be editable. Original files should be attached and clearly labeled (e.g., Figure_1.xlsx, Table_2.docx), with corresponding numbering in the text.
- For further information or editorial inquiries, please contact: monica.suarez@escuelaing.edu.co