ISSN DIGITAL: 2619-6409

Revista de Investigaciones de Uniagraria

Vol. 13 No. 1 • Enero - Diciembre de 2025

UNIAGRARIA
LA U VERDE DE COLOMBIA

ISSN DIGITAL: 2619-6409

Revista de Investigaciones de Uniagraria

Vol. 13 No. 1 • Enero - Diciembre de 2025

UNIAGRARIA
LA U VERDE DE COLOMBIA

Revista Investigaciones de UNIAGRARIA

Rector
Dr. Jorge Orlando Gaitán Arciniegas

Vicerrector de Investigación
Dr. Álvaro Mauricio Zúñiga Morales

Vicerrector de Asuntos Estudiantiles, Medio Universitario e Internacionalización
Dr. Jorge Arturo Torres Escobar

Vicerrectora Administrativa
Dra. María Alejandra Gaitán Castiblanco

Vicerrector Académico
Dr. Juan Carlos Reyes García

Secretario General
Dr. Albino Segura Penagos

Asamblea General
Dr. Héctor Jairo Guarín Avellaneda
Presidente

Consejo Superior
Dr. Álvaro Zúñiga García
Presidente

Dra. Teresa Arévalo Ramírez
Consejera

Dra. Teresa Escobar de Torres
Consejera

Dra. Gloria Nelly Rodríguez de Martínez
Consejera

Dr. Álvaro Ramírez Rubiano
Consejero

Dr. Héctor Jairo Guarín Avellaneda
Consejero

Dr. Jorge Orlando Gaitán Arciniegas
Consejero y Rector

Ángela María Farías Campomanes
Representante Principal por los Docentes

Antonio María Clareth Escobar Pacheco
Representante Principal por los Egresados

Fabian Esteban Olea Rueda
Representante Principal por los Estudiantes

Concepto gráfico, diseño y edición digital
Entrelibros SAS.
www.entrelibros.co

Diseñadora
Laura García Tovar

Corrector de estilo
Pablo Castellanos

Editor
Andrés Polo Roa
Director de investigación aplicada

Imágenes
Los textos de los artículos de esta publicación pueden ser reproducidos citando la fuente. Los juicios emitidos por los autores son de su responsabilidad. Por tanto, no comprometen a la Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA, a la Facultad de Ciencias Agrarias ni al Comité Editorial.

© 2025 Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA

ISSN DIGITAL: 2619-6409

Revista de Investigaciones de Uniagraria by Fundación Universitaria Agraria de Colombia -UNIAGRARIA- is licensed under a *Creative Commons* Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Unported License.

La Revista de Investigaciones de Uniagraria es digital bajo el ISSN 2619-6409, en idioma español. Es un producto protegido por *copyright* © y cuenta con una política de acceso abierto para su consulta, sus condiciones de uso y distribución están definidas por el licenciamiento *Creative Commons* (CC).

Contenido

Editorial 5
Andrés Polo Roa
Director de investigación aplicada

Determinantes logísticos de la gestión de la sostenibilidad de los activos turísticos en Sabana Occidente, Cundinamarca
David Arturo Conto-López 7

Diseño viable y resiliente de la cadena de suministro de panela: un estudio con dinámica de sistemas
Carlos Javier Guerrero-Useda, Jeysser Johan Otero Díaz, Andrés Polo Roa 19

Identificación taxonómica no destructiva de *ammonites* del Cenomaniano-Coniaciano en Colombia mediante inteligencia artificial y aprendizaje profundo
Javier García-Guerrero, Ricardo Antonio Tobón 41

Planificación inicial de redes de CCUS en Colombia asistida por IA: un marco geoespacial-generativo
Andrés Polo 55

Optimización de rutas asistida cuánticamente para la exploración geológica marina con UAV
David Rojas-Arciniegas 74

Territorio y emprendimiento familiar en Chía, Colombia: desafíos de la informalidad, la viabilidad y la equidad de género en áreas rurales
Segundo Leonardo Cortés-López 93

Repensar la educación agrícola superior desde la tecnociencia y la reestructuración curricular
Deivis Suárez-Rivero, Olga Marín-Mahecha, Mauricio A. Sierra-Sarmiento, Edith Patricia Sánchez-Quiñonez, Valentina Arévalo-Marín, Maikel Suárez-Rivero 109

Instructivo para los autores 117

Editorial

Andrés Polo Roa
Director de investigación aplicada

La investigación universitaria constituye un pilar esencial para la construcción de sociedades más justas, innovadoras y sostenibles. Desde la Fundación Universitaria Agraria de Colombia (Uniagraria) reafirmamos nuestro compromiso con la generación y divulgación de conocimiento pertinente, que responda a los desafíos locales, nacionales y globales. La *Revista de Investigaciones Uniagraria* se consolida como un espacio académico para difundir los resultados de procesos investigativos rigurosos, promoviendo el diálogo entre disciplinas y fortaleciendo la relación universidad-empresa-sociedad.

El presente número reúne siete contribuciones que reflejan la diversidad de enfoques y temáticas que caracterizan la producción investigativa de nuestra comunidad académica. Aunque cada artículo aborda problemas específicos, en conjunto, ofrecen una mirada complementaria sobre cuestiones cruciales para el desarrollo sostenible, la innovación tecnológica y la transformación social. Este mosaico de investigaciones permite reconocer cómo, desde distintas áreas del saber, se construyen respuestas a retos que atraviesan tanto al sector agroindustrial como a las dinámicas urbanas, sociales y ambientales.

Los trabajos aquí presentados convergen en un propósito común: aportar soluciones aplicables, fundamentadas en marcos metodológicos sólidos y con clara proyección hacia el mejoramiento de las condiciones de vida y el fortalecimiento institucional. Ya sea mediante el análisis de cadenas productivas, el estudio de fenómenos ambientales, la exploración de innovaciones en educación o la aplicación de modelos tecnológicos, las investigaciones reafirman que el conocimiento es herramienta para la transformación y la equidad.

Uniagraria reconoce el valor de estas contribuciones no solo como logros individuales de investigadores y semilleros, sino como parte de un esfuerzo colectivo orientado a consolidar una cultura científica crítica, creativa y comprometida con el territorio. En un contexto donde los desafíos son cada vez más complejos e interdependientes, nuestra revista se erige como un escenario que

fomenta la reflexión interdisciplinar y el debate informado, elementos indispensables para la construcción de un país más competitivo, resiliente e inclusivo.

Invitamos a nuestros lectores a recorrer estas páginas con la convicción de que cada artículo, desde su especificidad, nutre un horizonte común de conocimiento y acción. Al mismo tiempo, extendemos nuestro reconocimiento a los autores, evaluadores y equipos editoriales que hacen posible esta publicación, recordándonos que la ciencia es, ante todo, un ejercicio de colaboración y confianza.

La *Revista de Investigaciones Uniagraria* reafirma así su vocación de ser puente entre saberes, escenarios y actores, promoviendo un diálogo abierto que contribuya al cumplimiento de nuestra misión institucional: formar profesionales y ciudadanos capaces de transformar realidades con responsabilidad social, innovación y compromiso con el desarrollo sostenible del país.

Determinantes logísticos de la gestión de la sostenibilidad de los activos turísticos en Sabana Occidente, Cundinamarca

David Arturo Conto-López[1]

Artículo de investigación

Fecha de recepción: 16 de noviembre de 2024 ▪ **Fecha de aceptación:** 12 de febrero de 2025 ▪ **Fecha de publicación:** 12 de junio de 2026

Maestría en Ingeniería, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia. conto.david@uniagraria.edu.co

Conto-López, D. A. (2026). Determinantes logísticos de la gestión de la sostenibilidad de los activos turísticos en Sabana Occidente, Cundinamarca. *Revista de Investigaciones Uniagraria*, *13*(1), 7-18.

Resumen

El turismo se ha consolidado como un motor clave del desarrollo territorial en economías en crecimiento, emergentes y de frontera. Este sector integra —no siempre de forma coordinada ni eficiente— marcos normativos, políticas públicas, recursos de diversa procedencia y proyectos heterogéneos para el uso y la gestión de los activos turísticos. Tales activos presentan una notable diversidad y singularidad asociada a sus contextos físicos, y su prolongado ciclo de vida aconseja administrarlos más como inventarios que como productos, sobre todo cuando su creación implica inversiones significativas, de modo que los costos de conservación y depreciación resultan determinantes. Para contrarrestar el deterioro físico y la depreciación gradual de estos activos, así como para proteger el patrimonio natural y cultural que los sustenta, es indispensable comprender el ritmo del desarrollo ambiental, cultural y económico global, así como su manifestación específica en cada territorio. En este sentido, identificar los determinantes de gestión de los activos turísticos desde la óptica logística constituye una estrategia esencial, pues las particularidades logísticas locales habilitan el impacto positivo del turismo, la sostenibilidad de la cadena de abastecimiento turística, la preservación de rasgos culturales y la creación de modalidades innovadoras de turismo en entornos ambiental y territorialmente sostenibles. Para ello, se requiere una metodología de análisis múltiple —contextual, estructural y relacional— capaz de orientar de manera efectiva la acción pública frente a la complejidad del turismo en los territorios. El presente estudio modela dicha metodología, tomando como caso la Provincia de Sabana Occidente, en el departamento de Cundinamarca (Colombia), con el fin de definir los determinantes logísticos propios para la gestión de sus activos turísticos.x

Palabras clave: activos turísticos, cadena turística de abastecimiento, desarrollo territorial, determinantes logísticos, gestión pública del turismo, Sabana Occidente, sostenibilidad ambiental y cultural.

[1] Maestría en Ingeniería, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia

Logistical determinants of the sustainability management of tourist assets in Sabana Occidente, Cundinamarca

Abstract

Tourism has consolidated itself as a key driver of territorial development in growing, emerging, and frontier economies. The sector integrates—though not always in a coordinated or efficient manner—regulatory frameworks, public policies, resources from diverse sources, and heterogeneous projects for the use and management of tourist assets. These assets exhibit marked diversity and uniqueness tied to their physical contexts, and their long-life cycles suggest managing them more as inventories than as products—particularly when their creation requires substantial investment, so conservation and depreciation costs become decisive.

To counter physical deterioration and gradual depreciation of these assets, as well as to safeguard the natural and cultural heritage that underpins them, it is essential to understand the pace of global environmental, cultural, and economic development and how it manifests locally. Identifying management determinants of tourist assets from a logistics perspective is therefore a crucial strategy, since local logistics specificities enable tourism's positive impact, the sustainability of the tourism supply chain, the preservation of cultural features, and the emergence of innovative tourism modalities in environmentally and territorially sustainable settings. This requires a multi-order analytical methodology—contextual, structural, and relational—capable of effectively guiding public action in the face of tourism's territorial complexity. The study operationalizes this methodology using the case of the Sabana Occidente Province in the Department of Cundinamarca, Colombia (South America), to define logistics determinants specific to the management of its tourist assets.

Keywords: tourist assets, logistics determinants, territorial development, tourism supply chain, environmental and cultural sustainability, public management of tourism, Sabana Occidente.

Introducción

El turismo se ha afianzado como un vector de desarrollo territorial cuyo desempeño depende, cada vez más, de las condiciones logísticas y de gobernanza que median entre los recursos locales y los mercados turísticos. La literatura reciente muestra que los destinos no son entornos estáticos, sino sistemas socio-territoriales complejos donde confluyen infraestructuras, arreglos normativos, prácticas comunitarias y dinámicas de mercado; allí, las escalas de decisión y de intervención se "fijan" o reconfiguran y condicionan la sostenibilidad de los territorios y de sus activos (p. ej., ríos, paisajes culturales, patrimonios) a lo largo de gradientes urbano-rurales (Giraldo-Martínez *et al*., 2025). En este marco, los activos turísticos —por su heterogeneidad, arraigo territorial y ciclos de vida prolongados— requieren ser gestionados como inventarios estratégicos más que como "productos" de rotación rápida, articulando mantenimiento, depreciación, conectividad, información y coordinación interinstitucional dentro de cadenas turísticas de abastecimiento (Ruiz-Meza & Montoya-Torres, 2022).

A la vez, la sostenibilidad no se logra únicamente por la participación local o por la protección normativa: también exige capacidades logísticas y de actualización productiva (*upgrading*) que permitan adaptar servicios, organizar flujos y reinvertir en la calidad de la oferta (López-Argota *et al*., 2023). Evidencia comparada en turismo comunitario revela una paradoja de sostenibilidad: altos niveles de participación y empoderamiento pueden no traducirse en trayectorias sostenibles si no se alcanzan mejoras organizacionales y de gestión (*marketing*, canales, operaciones), mientras que arreglos con actores externos, bien gobernados, pueden facilitar aprendizajes y escalamiento de valor (Liu *et al*., 2025). En territorios híbridos —como los bordes urbano-rurales— esta tensión se superpone con disputas por el uso del suelo, la infraestructura y los bienes comunes, por lo que los determinantes logísticos (infraestructura y accesibilidad, información y trazabilidad, coordinación público-comunitaria-empresarial, capacidades de mantenimiento e inversión, y mecanismos de conexión aguas arriba/abajo en sistemas ambientales) se vuelven decisivos para sostener los activos y distribuir beneficios (Quimbayo Ruiz *et al*., 2020).

Revisión de literatura

Turismo como motor de desarrollo territorial y sostenibilidad

El turismo se ha consolidado como un catalizador del desarrollo económico y social, pero su sostenibilidad depende de la forma en que se gestionen los recursos y las cadenas de valor asociadas. Infante (2014) muestra cómo los determinantes logísticos inciden directamente en la competitividad de los destinos y en la posibilidad de transformar los activos turísticos en inventarios estratégicos de largo plazo. De manera complementaria, estudios sobre modelos de gestión integrada en empresas turísticas evidencian que la articulación de las Mipymes y la formalización de servicios son esenciales para sostener destinos de clase mundial (López-Argota *et al*., 2023). Estas perspectivas se enmarcan en la discusión sobre la sostenibilidad territorial, donde la planeación estratégica debe considerar tanto la calidad de los servicios como la preservación de los ecosistemas y patrimonios culturales (Rojas, 2023).

Logística, planificación y nuevas metodologías de análisis

La investigación en logística turística ha avanzado hacia modelos de optimización y herramientas computacionales que permiten abordar la complejidad de la planificación de viajes y destinos. Por ejemplo, Ruiz-Meza y Montoya-Torres (2022) presentan una revisión sistemática enfatizando cómo los modelos matemáticos y heurísticos aportan a la eficiencia en la gestión de flujos de turistas. Con respecto a la técnica heurística, se observa la aplicación de un algoritmo GRASP a problemas multimodales en turismo, resaltando el valor de la optimización logística en escenarios con múltiples restricciones (Ruiz-

Meza *et al*., 2021). Estas metodologías cuantitativas complementan los análisis de sostenibilidad en contextos rurales, donde se han desarrollado marcos de evaluación que integran dimensiones sociales, ambientales y económicas (Ordoñez-Sierra *et al*., 2021). La articulación de estas perspectivas revela que la logística turística no se limita a transporte o infraestructura, sino que abarca la administración integral de activos, flujos de información y coordinación interinstitucional (Ordoñez-Sierra *et al*., 2021; Yang & Ning, 2025).

Perspectivas territoriales y socioecológicas en el turismo

El territorio es un elemento central en la literatura reciente (Vargas Leira & Prada, 2023). La cartografía crítica y la contracartografía (*counter-mapping*) permiten repensar la gestión de afluentes hídricos como el río Bogotá, articulando escalas aguas arriba y aguas abajo mediante procesos comunitarios de cuidado (Del Busto Pinzón & De Souza, 2016; Giraldo-Martínez *et al*., 2025). Esta dimensión eco-escalar complementa el análisis de Quimbayo Ruiz *et al*. (2020), quienes destacan las estrategias campesinas frente a la expansión urbana en Bogotá, y de Samper-Mendívil *et al*. (2025), que subrayan la importancia del conocimiento situado en procesos de gestión turística rural. En la misma línea, estudios sobre turismo creativo muestran que las comunidades pueden movilizar prácticas culturales para impulsar el desarrollo sostenible en entornos urbanos y rurales (Suriyankietkaew *et al*., 2025). Además, la investigación sobre prácticas campesinas, usos del suelo y reconfiguraciones territoriales refuerza la necesidad de integrar enfoques de gobernanza ambiental, logística y cultural para construir modelos turísticos sostenibles en regiones como Cundinamarca (Quimbayo Ruiz *et al*., 2020).

Síntesis

En conjunto, los artículos revisados revelan que la sostenibilidad del turismo requiere de una visión integral que combine: 1) la gestión logística de activos como inventarios estratégicos; 2) la participación comunitaria y la gobernanza multinivel; 3) herramientas de optimización y planificación aplicadas a problemas turísticos complejos, y 4) una comprensión territorial y socioecológica que reconozca las tensiones urbano-rurales y las dinámicas ambientales. Esta convergencia teórica y metodológica respalda la pertinencia de estudiar los determinantes logísticos en contextos locales como la Provincia de Sabana Occidente (Cundinamarca, Colombia), articulando así competitividad, equidad y sostenibilidad.

Metodología

El presente estudio se caracteriza como mixto, transversal, con integración cuali-cuantitativa orientada a describir, analizar y explicar los determinantes logísticos que inciden en la gestión sostenible de los activos turísticos en Sabana Occidente. El enfoque se inserta en la logística sustentable y la sustentabilidad de cadenas de abastecimiento turística, delimitando el caso provincial para estructurar un modelo integral de análisis y derivar hallazgos operativos para la gestión pública y sectorial.

Se realizó una revisión documental de carácter secundario (planes, diagnósticos y bases oficiales/departamentales) y de literatura sectorial reciente para identificar y depurar factores vinculados con productividad, competitividad, internacionalización y sostenibilidad del destino; con base en lo anterior, se consolidó un inventario de estudios previos municipales (caracterizaciones de los años 2018-2019) como línea base.

A partir del análisis documental y sectorial se configuró un conjunto de 28 factores (ambientales, socioeconómicos, institucionales y logísticos) asociados al desempeño de la cadena turística provincial. Estos factores se rastrearon en actores, atributos, roles y figuras para su uso posterior en los planos E (análisis estructural de actores) y R (análisis relacional y priorización de determinantes). Se justificó la necesidad de una metodología con mayor significancia contextual para cuantificar determinantes de impacto logístico,

alineada con indicadores reales de competitividad territorial y con ejes de política (IMD; planes regionales y sectoriales).

Plano E (estructural): análisis de actores

Con base en datos abiertos (p. ej., el Registro Nacional de Turismo [RNT]) y fuentes institucionales, se listaron actores de la cadena turística (ministerios, fondos, agencias, gobernación, cámaras de comercio, alcaldías y prestadores). Se categorizó cada actor por rol (administrador, financiador, regulador, promotor, asesor, prestador) y por figura (ministerio, entidad nacional/territorial, fondo, agencia, cámara, inversionista).

Así mismo, se seleccionaron doce atributos como variables para alimentar la metodología MICMAC (matriz de impacto cruzado con multiplicación aplicada a una clasificación) con escala 0-3 (0: sin influencia, 1: débil, 2: moderada y 3: fuerte). La modelación estima motricidad (influencia) y dependencia (subordinación) para construir el mapa de influencia-dependencia y clasificar actores dominantes, determinantes, autónomos y dominados.

Plano R (relacional): análisis relacional y priorización de determinantes

Se construyó un grafo dirigido entre los factores (nodos) con aristas ponderadas según la intensidad relacional, representando cadenas, rutas, ciclos, ramales, articulaciones y puentes entre componentes de la cadena turística.

Sobre la matriz de adyacencia/relaciones se calcularon índices de centralidad (grado saliente, intermediación) y se sintetizó un índice compuesto para priorizar determinantes logísticos con mayor capacidad de propagación e impacto sistémico en eficiencia, transparencia, inclusión, participación y prospección de la cadena. El resultado es un Top-N de determinantes con trazabilidad analítica.

Resultados

Plano C (contextual): análisis contextual de factores

El análisis contextual permitió identificar un conjunto de 28 factores críticos que inciden de manera directa en la gestión de los activos turísticos de Sabana Occidente. Estos factores, organizados en varias dimensiones (ambiental, socioeconómica, político-institucional y logística), constituyen la base sobre la cual se construye el diagnóstico del territorio turístico. La tabla 1 presenta de manera sistemática los factores identificados, junto con sus atributos, roles y figuras institucionales asociadas.

Tabla 1. Factores identificados en el estudio

	Factor	Atributo de la entidad	Rol	Figura
1	Creciente preocupación por el cambio climático y la sostenibilidad ambiental	Adopta/promueve prácticas frente al cambio climático y la sostenibilidad ambiental	Prestador	Prestador
2	Aumento de la concienciación sobre la sostenibilidad en el sector turístico	Promulga una política ante la sostenibilidad del sector turístico	Regulador	Ministerio
3	Creciente demanda de turismo sostenible por parte de los viajeros	Aprovecha la creciente demanda de turismo sostenible	Prestador	Prestador
4	Incremento de estudios e investigaciones sobre el turismo sostenible	Direcciona productos y servicios con innovación informada sobre turismo sostenible	Asesor	Cámara de comercio
5	Impacto de las políticas públicas	Requiere impacto de las políticas públicas	Financiador	Agencia/ Inversionista
6	Condiciones ambientales y sociodemográficas	Define políticas ambientales y sociodemográficas	Regulador	Ministerio
7	Condiciones económicas y legales	Determina condiciones económicas y legales	Regulador	Entidad del orden nacional
8	Deficiencia o carencia de infraestructura turística	Gestiona la infraestructura turística	Administrador	Entidad del orden territorial
9	Deficiencia en alcance de la promoción con proyectos públicos	Fomenta el alcance de la promoción con proyectos públicos	Promotor	Fondo
10	Disposición de un inventario de activos y atractivos	Rige la administración de los activos y atractivos turísticos	Administrador	Entidad del orden territorial
11	Gestión de alianzas para la promoción	Gestiona alianzas para la promoción	Promotor	Fondo
12	Gestión de la empleabilidad y el emprendimiento	Origina empleabilidad y emprendimiento	Prestador	Prestador
13	Uso de TIC para la promoción	Explota el uso de TIC	Promotor	Fondo

14	Deficiencia en inversión	Depende de la inversión	Prestador	Prestador
15	Inseguridad	Es susceptible a la inseguridad	Prestador	Prestador
16	Falencias en divulgación y mercadeo	Adolece de falencias en divulgación y mercadeo	Prestador	Prestador
17	Eficiencia relacional de los actores	Fomenta la eficiencia relacional de los otros actores	Promotor	Fondo
18	Ruralidad como producto turístico	Valora la ruralidad como fuente de productividad turística	Asesor	Cámara de comercio
19	Responsabilidad, conectividad y conservación	Regula la responsabilidad, la conectividad y la conservación	Regulador	Entidad del orden nacional
20	Empresa, emprendimiento y asociatividad	Promueve el emprendimiento y la asociatividad	Promotor	Fondo
21	Promoción y mercadeo	Fomenta el sector turismo a nivel interno y externo	Promotor	Fondo
22	Condiciones institucionales para el fomento	Define políticas de fomento	Financiador	Fondo
23	Gestión de la oferta	Gestiona la oferta y la demanda	Promotor	Promotor
24	Gestión de inversión, infraestructura y conectividad	Agencia recursos para infraestructura y conectividad	Financiador	Agencia
25	Innovación y desarrollo empresarial en el sector turismo	Promueve la innovación y el desarrollo del sector turismo	Promotor	Fondo
26	Fortalecimiento del capital humano para la competitividad	Fortalece el capital humano para la competitividad	Asesor	Cámara de comercio
27	Promoción con inclusión y equidad	Regula la inclusión y la equidad	Regulador	Ministerio
28	Categoría del actor de la cadena turística de abastecimiento	Define las categorías de los otros actores	Asesor	Cámara de comercio

En la dimensión ambiental, se evidenció la tensión permanente entre la riqueza natural (ríos, páramos, paisajes rurales) y las amenazas derivadas de la degradación de recursos no renovables, la deforestación y el uso inadecuado del suelo. La creciente presión urbana sobre áreas rurales ha intensificado conflictos en torno al agua, la disposición de residuos y la capacidad de carga de los ecosistemas, factores que, en ausencia de planificación estratégica, comprometen la sostenibilidad de los activos turísticos.

En la dimensión socioeconómica, los hallazgos muestran limitaciones en la generación de empleo estable y bien remunerado en el sector turístico, alta informalidad empresarial y escasa diversificación de productos turísticos. Aunque la demanda de turismo rural y de naturaleza ha crecido, los beneficios económicos no se distribuyen equitativamente en las comunidades, lo que genera vulnerabilidad frente a crisis macroeconómicas y fluctuaciones de la demanda. Así mismo, el capital humano presenta brechas de formación, con carencias en competencias logísticas, bilingüismo y uso de tecnologías digitales, lo que limita la calidad y competitividad del destino.

En el plano político-institucional, se identificaron debilidades en la articulación de políticas públicas, falta de continuidad en los planes de desarrollo municipal y departamental, y una débil coordinación interinstitucional entre entidades nacionales, departamentales y locales. Esta fragmentación genera duplicación de esfuerzos, subutilización de recursos y ausencia de una estrategia integral de largo plazo para el turismo. Adicionalmente, las comunidades perciben baja participación en los procesos de planificación, lo que incrementa la desconfianza en las políticas públicas.

La dimensión logística reveló la centralidad de factores asociados a infraestructura vial, transporte, conectividad digital y promoción de destinos. Las deficiencias en carreteras secundarias, el transporte público insuficiente y la limitada conectividad digital restringen el acceso a los activos turísticos y encarecen los costos de operación. La promoción internacional y nacional es fragmentada, con esfuerzos desarticulados entre actores públicos y privados. Estos elementos, combinados, muestran que los activos turísticos de Sabana Occidente poseen gran potencial, pero su aprovechamiento sostenible depende de superar cuellos de botella logísticos que condicionan tanto la competitividad como la conservación.

En conjunto, el plano C ofrece una radiografía integral del territorio, revelando un inventario de activos valioso pero sometido a riesgos ambientales, institucionales y de infraestructura. La identificación de los 28 factores permite comprender que la sostenibilidad turística trasciende la conservación cultural y natural, e involucra necesariamente la gestión logística como eje articulador.

Análisis estructural de actores (plano E)

El análisis estructural, desarrollado mediante la metodología MICMAC, permitió clasificar a los actores de la cadena turística en función de su grado de influencia y dependencia. Los resultados muestran un sistema fuertemente centralizado en la institucionalidad pública, con brechas significativas en la capacidad de incidencia de los actores locales y privados.

Las alcaldías municipales surgieron como actores dominantes, ya que concentran funciones relacionadas con el ordenamiento territorial, la inversión en infraestructura básica, la prestación de servicios públicos y la administración directa de activos turísticos patrimoniales. Su motricidad es elevada, pues las decisiones que tomen condicionan la viabilidad de proyectos turísticos locales; sin embargo, presentan alta heterogeneidad en capacidades, dependiendo de recursos fiscales, voluntad política y continuidad administrativa.

En contraste, las cámaras de comercio y asociaciones empresariales se ubicaron como actores autónomos. Aunque generan información

valiosa a través del RNT y proveen asesoría mercantil, su incidencia sobre políticas y decisiones estratégicas es limitada. Su baja dependencia las convierte en actores con capacidad técnica, pero con poco poder de transformación sobre la cadena.

Los prestadores de servicios turísticos, principalmente micro y pequeñas empresas de alojamiento, gastronomía y agencias locales, fueron clasificados como actores dominados. Su capacidad de acción es restringida por la dependencia de financiamiento externo, la regulación pública y el entorno político-económico. A pesar de ser los encargados de la operación directa de los servicios turísticos, carecen de influencia para transformar el sistema y asegurar condiciones de sostenibilidad.

Por último, los ministerios nacionales y fondos de promoción turística se consolidaron como actores determinantes, ya que fijan las reglas de operación del sector, asignan recursos financieros significativos y orientan las líneas de promoción a nivel nacional e internacional. Su influencia es estructural y condiciona la estrategia de los actores locales.

El mapa de influencia-dependencia revela, por tanto, un escenario donde la sostenibilidad de los activos turísticos depende de la interacción entre actores públicos con alta motricidad y actores privados con bajo poder de incidencia. Este desbalance constituye un reto para la gobernanza del turismo en Sabana Occidente, pues limita la posibilidad de generar cadenas de valor inclusivas y resilientes.

Análisis relacional y priorización de determinantes (plano R)

El análisis relacional permitió integrar los factores identificados en el plano C con la estructura de actores descrita en el plano E, utilizando grafos dirigidos y métricas de centralidad para determinar los determinantes logísticos prioritarios. Los resultados muestran que los factores con mayor capacidad de propagación e impacto sistémico en la red son:

1. **Inversión en infraestructura y conectividad:** actúa como eje articulador de accesibilidad, competitividad y mantenimiento de activos. Su ausencia limita el aprovechamiento de recursos y restringe la llegada de turistas.
2. **Coordinación público-comunitaria-empresarial:** la articulación entre diferentes niveles de gobierno, prestadores y comunidades es esencial para integrar políticas y estrategias. Su bajo puntaje de centralidad refleja una debilidad actual, pero su alto potencial de propagación lo convierte en determinante prioritario.
3. **Capacitación del capital humano:** la calidad del servicio turístico depende de competencias logísticas, bilingüismo, hospitalidad y manejo de TIC. Su fortalecimiento tiene un efecto multiplicador en lo que respecta a la satisfacción del visitante y la sostenibilidad cultural.
4. **Sistemas de información y trazabilidad digital:** la gestión de datos confiables sobre demanda, flujos y capacidades de carga es fundamental para tomar decisiones estratégicas y generar confianza en el mercado.
5. **Seguridad y confianza en el destino:** aunque transversal, este factor determina la percepción del turista y condiciona la competitividad. Su incidencia en la red es alta, al estar relacionado con inversión, promoción y participación comunitaria.

El *ranking* obtenido mediante función permanente y métricas de centralidad ubica a estos cinco determinantes como los más relevantes para la gestión sostenible de los activos turísticos en la provincia. La priorización no implica excluir otros factores, sino reconocer que el fortalecimiento de estos elementos tiene un efecto de arrastre sobre el conjunto del sistema.

Síntesis de hallazgos

Los resultados del análisis CER (Contextual Estructural Relacional) muestran que la

sostenibilidad turística en Sabana Occidente depende de un entramado complejo de factores ambientales, sociales, económicos, institucionales y logísticos. El contexto evidencia limitaciones estructurales en infraestructura, inversión y capacidades humanas; la estructura de actores refleja centralización en el sector público y debilidad en el sector privado, y el análisis relacional destaca cinco determinantes logísticos con mayor capacidad de transformación sistémica.

En conjunto, los hallazgos sugieren que la gestión sostenible de los activos turísticos debe orientarse a los siguientes determinantes: 1) invertir en infraestructura y conectividad; 2) fortalecer la gobernanza multinivel y la coordinación interinstitucional; 3) capacitar al capital humano en competencias logísticas y digitales; 4) consolidar sistemas de información para la trazabilidad de la actividad, y 5) garantizar condiciones de seguridad. Estos constituyen la base para diseñar políticas y estrategias que permitan a Sabana Occidente aprovechar su inventario de activos turísticos con criterios de competitividad y sostenibilidad de largo plazo.

Conclusiones

El presente estudio demuestra que la sostenibilidad de los activos turísticos en Sabana Occidente es, ante todo, un problema logístico-territorial: la perdurabilidad del inventario (natural, cultural y de servicios) depende de cómo se orquestan infraestructura y conectividad, coordinación entre actores, capacidades humanas, información/trazabilidad y condiciones de seguridad. La arquitectura metodológica CER permitió pasar de un diagnóstico amplio (28 factores) a un conjunto priorizado de determinantes logísticos con trazabilidad analítica, mostrando qué palancas tienen mayor capacidad de propagación en la red y, por tanto, mayor retorno sistémico cuando se intervienen primero.

En el plano contextual, se evidenció un inventario heterogéneo con alto potencial, pero tensionado por cuellos de botella de acceso, déficits de mantenimiento, brechas de capital humano y fragmentación de la promoción. Esta lectura confirma que los activos turísticos deben administrarse como inventario de ciclo largo —con políticas explícitas de conservación, depreciación y reinversión— y no solo como "productos" de rotación. Tal reconceptualización reubica la logística (transporte, conectividad digital, servicios públicos y estándares operativos) como eje transversal de sostenibilidad.

En el plano estructural, el sistema exhibe centralización pública: alcaldías con alta motricidad local, entidades nacionales y fondos como determinantes de reglas y recursos, cámaras como autónomas de soporte técnico y prestadores como dominados por restricciones financieras y regulatorias. Esta asimetría reduce la capacidad de aprendizaje colectivo y ralentiza la capacidad de actualización (upgrading) del destino. La conclusión operativa es clara: la sostenibilidad exige gobernanza multinivel con mecanismos de co-decisión y co-inversión que eleven la incidencia del tejido empresarial y comunitario sin perder coherencia territorial.

En el plano relacional, la priorización mostró cinco determinantes con mayor efecto multiplicador: 1) inversión en infraestructura y conectividad; 2) coordinación público-comunitaria-empresarial; 3) capacitación del capital humano; 4) sistemas de información y TIC para hacer la trazabilidad, y 5) seguridad. Intervenirlos primero es una estrategia de dominancia estructural: mejoran simultáneamente la accesibilidad, el uso eficiente del inventario, la calidad percibida, la confianza del visitante y la capacidad de ajuste del destino ante choques.

Desde la perspectiva de política pública, el estudio sugiere transitar de instrumentos dispersos a portafolios programáticos que integren: 1) obras de conectividad secundaria y última milla con criterios de mantenimiento y resiliencia; 2) convenios marco de cooperación entre alcaldías, cámaras, asociaciones y prestadores (con metas e indicadores compartidos); 3) un plan provincial

de formación dual (competencias logísticas, hospitalidad, bilingüismo y habilidades digitales); 4) una plataforma de inteligencia turística que integre RNT, movilidad, ocupación, capacidad de carga y reputación en línea, y 5) protocolos y alianzas para seguridad turística articuladas con promoción de destino. La combinación de estas cinco líneas constituye un mínimo vital de sostenibilidad para Sabana Occidente.

En términos de contribución académica, la metodología CER ofrece un puente entre diagnóstico cualitativo y decisión cuantitativa: vincula lectura territorial, análisis de actores (MICMAC) y priorización por grafos/función permanente, generando rankings justificables y fichas de intervención por determinante. Este encuadre es replicable en otros territorios y dialoga con debates recientes sobre gobernanza, logística turística y sostenibilidad, al tiempo que propone medir la viabilidad de gestión de los activos como propiedad del sistema (no de un actor aislado).

Entre las limitaciones, reconocemos: 1) la dependencia de calidad y cobertura de fuentes secundarias para el plano contextual; 2) posibles sesgos en la valoración de influencias entre actores y relaciones entre factores, que son mitigables con paneles Delphi y análisis de sensibilidad, y 3) la ausencia de un módulo econométrico que estime elasticidades de demanda o efectos de arrastre intersectoriales. Estas limitaciones no invalidan los hallazgos, pero abren una agenda de refinamiento empírico.

Como líneas futuras, se recomienda: 1) incorporar series temporales (movilidad, ocupación, gasto) para validar el impacto de intervenciones sobre los indicadores clave de desempeño (KPIs, sigla del nombre en inglés) de la sostenibilidad; 2) integrar modelos de asignación de recursos (p. ej., programación por metas) que optimicen la cartera de proyectos bajo restricciones presupuestales; 3) acoplar el análisis espacial (accesibilidad, centralidad geográfica, mapas de riesgo ambiental) para priorizar corredores; 4) evaluar mecanismos de cofinanciación (matching grants, bonos de impacto) para acelerar el mantenimiento o la adaptación del inventario, y 5) desplegar un cuadro de mando provincial con indicadores de ciclo de vida del activo (estado físico, costo de conservación, uso, valor reputacional, retorno social y ambiental).

En síntesis, la evidencia converge en un mensaje operativo: la sostenibilidad turística de Sabana Occidente no se logra con acciones aisladas ni con diagnósticos generales, sino con intervenciones logísticas priorizadas, gobernanza compartida y gestión del inventario de activos bajo métricas verificables. Ejecutar primero las cinco palancas identificadas habilita un círculo virtuoso de accesibilidad, calidad, confianza y reinversión que preserva el valor territorial y distribuye beneficios de manera más equitativa y duradera.

Referencias

Del Busto Pinzón, D. F., & De Souza, F. T. (2016). A data based model as a metropolitan management tool: The Bogotá-Sabana region case study in Colombia. *Land Use Policy, 54*, 253-263. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.02.019

Giraldo-Martínez, L., Boelens, R., & Duarte-Abadía, B. (2025). River mapping and the politics of eco-scalar fixes. Reconnecting upstream–downstream networks through critical cartographies of Colombia's Bogotá River. *Geoforum*, 165. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2025.104379

Infante Sánchez, E. del P. (2014). Elementos determinantes en Cundinamarca para el desarrollo del turismo como actividad estratégica regional. *Suma de Negocios*, 5(10), 40-48. https://doi.org/10.1016/s2215-910x(14)70008-4

Liu, Y., Wang, J., Huang, K., Li, Y. (William), & Wan, L. C. (2025). The sustainable paradox of community tourism in world cultural

heritage villages: The case of Xidi and Hong. *Annals of Tourism Research, 115*. https://doi.org/10.1016/j.annals.2025.104020

López-Argota, M. A., Monroy Anieva, M. B., Bernal Olvera, J. V., & Bernal Pérez, M. B. (2023). Sustainable Tourism Practices Based on Governance by MSMEs in Jardín (Colombia) and Tepotzotlán (Mexico) From 2019 to 2021. *Revista CEA*, 9(19), e2253. https://doi.org/10.22430/24223182.2253

Ordoñez-Sierra, G., Sarmiento-Senior, D., Jaramillo Gomez, J. F., Giraldo, P., Porras Ramírez, A., & Olano, V. A. (2021). Multilevel analysis of social, climatic and entomological factors that influenced dengue occurrence in three municipalities in Colombia. *One Health, 12*. https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2021.100234

Quimbayo Ruiz, G. A., Kotilainen, J., & Salo, M. (2020). Reterritorialization practices and strategies of campesinos in the urban frontier of Bogotá, Colombia. *Land Use Policy, 99*. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105058

Rojas, L. M. R. (2023). La importancia de las preguntas ambientales en el planeamiento territorial. El caso del impacto hídrico-ambiental generado por la implementación del RegioTram de Occidente en Bogotá y la región de la Sabana. *Territorios, 49*. https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.12575

Ruiz-Meza, J., Brito, J., & Montoya-Torres, J. R. (2021). A GRASP to solve the multi-constraints multi-modal team orienteering problem with time windows for groups with heterogeneous preferences. *Computers and Industrial Engineering, 162*. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107776

Ruiz-Meza, J., & Montoya-Torres, J. R. (2022). A systematic literature review for the tourist trip design problem: Extensions, solution techniques and future research lines. *Operations Research Perspectives, 9*. https://doi.org/10.1016/j.orp.2022.100228

Samper-Mendívil, M., Aramendia-Muneta, M., & Alarcón-López, R. (2025). Assessing sustainability in rural tourism: Insights from accommodation managers and residents in Navarre. *Journal of Rural Studies, 120*, 103866. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2025.103866

Suriyankietkaew, S., Krittayaruangroj, K., Thinthan, S., & Lumlongrut, S. (2025). Creative tourism as a driver for sustainable development: A model for advancing SDGs through community-based tourism and environmental stewardship. *Environmental and Sustainability Indicators, 27*, 100828. https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100828

Vargas Leira, F. de J., & Prada, J. L. (2023). Formación en turismo sostenible: revisión de literatura de cara a la creación de un programa de maestría en el departamento del Magdalena (Colombia). *Turismo y Sociedad, 33*, 255-274. https://doi.org/10.18601/01207555.n33.11

Yang, L., & Ning, W. (2025). Mechanisms and effects of the sustainable integration of digital-driven rural cultural tourism from the perspective of symbiosis. *Sustainable Futures, 10*. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100867

Diseño viable y resiliente de la cadena de suministro de panela: un estudio con dinámica de sistemas

Carlos Javier Guerrero-Useda[1]
Jeysser Johan Otero Díaz[2]
Andrés Polo Roa[1]

Artículo de investigación

Fecha de recepción: 21 de febrero de 2025 ▪ **Fecha de aceptación:** 11 de abril de 2025 ▪ **Fecha de publicación:** 12 de junio de 2026

Programa de Ingeniería Industrial, Universidad de Cundinamarca, Soacha, Colombia. jjotero@ucundinamarca.edu.co

Guerrero-Useda, C. J., Otero Díaz, J. J., & Polo Roa, A. (2026). Diseño viable y resiliente de la cadena de suministro de panela: un estudio con dinámica de sistemas. *Revista de Investigaciones Uniagraria, 13*(1), 19-40.

Resumen

Las cadenas de suministro agroalimentarias enfrentan entornos de alta incertidumbre (clima, logística, demanda) que amplifican el efecto dominó ante disrupciones locales. Más allá de la resiliencia puntual, la viabilidad enfatiza la capacidad de adaptación sostenida del sistema, integrando agilidad y sostenibilidad a lo largo del tiempo. En este trabajo se propone y evalúa un marco de viabilidad para la cadena de suministro de panela, que integre resiliencia, agilidad y sostenibilidad, utilizando dinámica de sistemas (DS) y la analogía con el sistema inmune del cuerpo humano. Para esto, se construyó un modelo DS que representa los eslabones agrícolas de transformación, homogenización y empaque. Se analizaron cinco escenarios: 1) cadena base; 2) interrupción agrícola; 3) interrupción de transporte; 4) incremento súbito de demanda, y 5) reducción de capacidad de almacenamiento. Se calcularon indicadores de desempeño (nivel de servicio, costos de transporte e inventarios por eslabón) y un Índice de Resiliencia (SCRI) que combina servicio y costo normalizado. La cadena exhibe mayor fragilidad ante choques en el eslabón agrícola (servicio 0.543) y en transporte (servicio 0.746), con efectos dominó sobre homogenización y empaque. El incremento de demanda mostró mayor resiliencia (servicio 0.996; SCRI ≈ 0.999) por la respuesta coordinada de producción e inventarios. La reducción de almacenamiento elevó costos de transporte (≈ $ 105,1 millones), pese a un servicio alto (0.93), revelando un trade-off costo-servicio. El marco traduce principios inmunológicos (barreras, redundancia pasiva, activación adaptativa) en políticas de inventario de mitigación, flexibilidad logística y planes de contingencia, y ofrece un indicador sintético (SCRI) para decisiones tácticas. La viabilidad de la cadena depende de blindar el eslabón agrícola, optimizar *buffers* e inventarios de mitigación y coordinar transporte bajo restricciones de almacenamiento. El enfoque DS-inmunológico facilita el diseño de respuestas anticipatorias y rutas de recuperación costo-efectivas.

Palabras clave: agroindustria de la panela, dinámica de sistemas, índice de resiliencia, sistema inmune, sostenibilidad, viabilidad de cadenas de suministro.

[1] Maestría en ingeniería, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia.
[2] Programa de Ingeniería Industrial, Universidad de Cundinamarca, Soacha, Colombia

Viable and Resilient Design of the Panela Supply Chain: A System Dynamics Study

Abstract

Agri-food supply chains face highly uncertain environments (climate, logistics, demand) that amplify domino effects under local disruptions. Beyond punctual resilience, **viability** emphasizes the system's sustained adaptive capacity, integrating agility and sustainability over time. This study proposes and evaluates a viability framework for the panela supply chain that integrates resilience, agility, and sustainability, using System Dynamics (SD) and the immune system analogy. An SD model was developed to represent the agricultural, transformation, homogenization, and packaging stages. Five scenarios were analyzed: (i) baseline chain, (ii) agricultural disruption, (iii) transportation disruption, (iv) sudden demand surge, and (v) reduced storage capacity. Performance indicators (service level, transportation costs, and inventories by stage) and a Supply Chain Resilience Index (SCRI) combining service and normalized cost were calculated. The chain exhibits greater fragility under shocks at the agricultural stage (service 0.543) and transportation stage (service 0.746), with domino effects on homogenization and packaging. The demand surge showed the highest resilience (service 0.996; SCRI≈0.999) due to coordinated production and inventory response. Reduced storage capacity significantly increased transportation costs (≈USD 105.1 million) despite a high service level (0.93), revealing a service–cost trade-off. The framework translates **immunological principles** (barriers, passive redundancy, adaptive activation) into mitigation inventory policies, logistical flexibility, and contingency plans, while providing a synthetic indicator (SCRI) for tactical decision-making. The chain's viability depends on securing the agricultural stage, optimizing buffers and mitigation inventories, and coordinating transportation under storage restrictions. The SD–immune-based approach facilitates the design of anticipatory responses and cost-effective recovery paths.

Keywords: supply chain viability, system dynamics, panela agroindustry, immune system, sustainability, resilience index.

Introducción

Las cadenas de suministro (CS) configuradas en la era de la globalización se caracterizan por ser estructuras predominantemente estáticas, lo que limita su capacidad de resiliencia y adaptabilidad (Ivanov & Dolgui, 2020). El siglo XXI ha estado marcado por hitos disruptivos como la revolución tecnológica de la Industria 4.0, la pandemia del Covid-19 y la creciente preocupación frente al cambio climático, cuyos efectos han impactado de manera significativa el desempeño de las cadenas de suministro a nivel global (Balezentis *et al*., 2023). Estos fenómenos se vieron amplificados por transformaciones en el comportamiento de los consumidores, quienes recurrieron a compras de pánico de productos alimenticios de larga duración (Loxton *et al*., 2020), reconfigurando percepciones y prioridades en torno a la gestión de las cadenas de suministro (MacCarthy *et al*., 2022).

Diversos estudios han mostrado que la pandemia interrumpió el desarrollo de capacidades resilientes en las cadenas de suministro (Barman *et al*., 2021; Sarkis *et al*., 2020). Aunque se implementaron estrategias tanto proactivas como reactivas, estas resultaron insuficientes para neutralizar los efectos negativos (Ozdemir *et al*., 2022). En paralelo, la gestión tradicional de las cadenas se ha ampliado hacia enfoques que integran capacidad de respuesta y agilidad, lo cual incrementó la complejidad de los sistemas y reorientó la atención hacia la gestión del riesgo (Dai, 2016; Esmaeili-Najafabadi *et al*., 2021; A. R. Singh *et al*., 2012).

Eventos recientes, como fenómenos climáticos extremos o crisis sanitarias, han evidenciado la falta de viabilidad en muchas cadenas de suministro, al colapsar por disrupciones en nodos locales, la propagación del efecto dominó y la pérdida de conectividad (Chervenkova & Ivanov, 2023). Tales interrupciones han impactado gravemente múltiples dimensiones del desempeño, y las empresas han mostrado dificultades para recuperarse de las pérdidas económicas derivadas (Glas *et al*., 2021). Aunque existen herramientas de planificación para distintos horizontes temporales y niveles de agregación —desde estrategias de largo plazo hasta métodos operativos como MPS o MRP—, el reto central sigue siendo cómo diseñar cadenas capaces de afrontar eventos disruptivos (Srinivasan & Tew, 2017).

Este desafío es especialmente relevante en el sector agroalimentario, caracterizado por alta complejidad, incertidumbre y múltiples interdependencias (Romero-Riaño *et al*., 2020). Las disrupciones recientes han puesto de relieve la vulnerabilidad de la producción agrícola ante perturbaciones externas, revelando conexiones olvidadas entre agricultura, sociedad y economía (Anderson *et al*., 2021; Phillips *et al*., 2024). Al mismo tiempo, los consumidores demandan mayores garantías de calidad y seguridad en los productos agrícolas, lo cual eleva los requisitos de desempeño de las cadenas agroalimentarias (Z. Li *et al*., 2022). Esta combinación de incertidumbre y presión sobre la seguridad alimentaria proyecta riesgos crecientes para la disponibilidad de alimentos (Bassett *et al*., 2021). Por ello, la construcción de cadenas agroalimentarias adaptables, reconfigurables, resilientes y viables se ha convertido en una prioridad de investigación y de gestión (Ivanov, 2024).

En este contexto, resulta imperativo adoptar enfoques de gestión resiliente que integren sostenibilidad como eje central, superando la visión tradicional en la que esta se limitaba a aspectos logísticos. Hoy, la sostenibilidad se reconoce como una condición estructural de las cadenas de suministro modernas, particularmente en ámbitos como la distribución y el transporte. Sin embargo, aún persiste la necesidad de técnicas de modelado que permitan analizar escenarios de crisis y guiar la construcción de cadenas agroalimentarias viables en el largo plazo.

La problemática de interrupciones en las cadenas de suministro puede comprenderse mediante la analogía con el cuerpo humano, constantemente expuesto a agentes patógenos. El sistema inmune responde con células B y T,

que eliminan o neutralizan las amenazas (Khan *et al*., 2019). Siguiendo esta lógica, un "sistema de suministro saludable" requiere no solo soluciones puntuales, sino la capacidad de sostener resiliencia en el tiempo, es decir, viabilidad (Ivanov, 2022). Esta analogía se alinea con investigaciones que conciben la resiliencia y la viabilidad como atributos que aseguran la "salud" de la cadena frente a disrupciones (Ivanov, 2024). No obstante, la mayoría de las cadenas carecen de lineamientos para modelar impactos de interrupciones bajo condiciones extremas (Najafi *et al*., 2024), lo que provoca reacciones tardías, coordinación deficiente y periodos prolongados de escasez (Queiroz *et al*., 2022). En contraste, un diseño "inmune" de la cadena podría fomentar respuestas más rápidas y efectivas.

Si bien los enfoques actuales ofrecen marcos útiles, pocos resultan lo suficientemente flexibles y universales para enfrentar una amplia gama de eventos inesperados. En esta medida, el diseño de redes logísticas puede adaptar funciones del sistema inmunológico, que aporta principios como inmunidad innata, adaptativa y degeneración funcional (Liu *et al*., 2023; Glas *et al*., 2021). Según Ivanov (2024), en vista de que aún existe escasez de modelos formales que integren explícitamente mecanismos inmunológicos en el diseño de la resiliencia de cadenas de suministro.

En el presente artículo se propone un marco para la viabilidad de cadenas agroalimentarias inspirado en el sistema inmune, capaz de actualizar planes de corto plazo y preparar a la red para riesgos futuros. Aunque es aplicable a riesgos operativos y disruptivos, aquí se centra en estos últimos. Con ello se avanza hacia un sistema integral de gestión de interrupciones, al tiempo que se identifican líneas de investigación prospectivas para enriquecer la literatura existente sobre resiliencia de cadenas de suministro.

El enfoque propuesto adquiere especial relevancia en el sector agroindustrial colombiano, que busca insertarse competitivamente en mercados internacionales con productos como aguacate, cacao, frutas, hortalizas y panela. Estos sectores enfrentan demandas crecientes en materia de inocuidad y calidad, al tiempo que lidian con la dispersión geográfica, la volatilidad climática y la heterogeneidad tecnológica de los productores. Estos factores plantean la necesidad de innovaciones que fortalezcan la capacidad de respuesta y viabilidad de las cadenas, asegurando un desempeño robusto frente a los retos actuales y futuros.

Revisión de literatura

A continuación, se identifican y analizan aportes recientes sobre la viabilidad en el diseño de redes de cadenas de suministro (SCND, sigla del nombre en inglés), con el fin de cartografiar el estado del arte y evidenciar las brechas de investigación vigentes. Para ello, se revisan las principales tipologías de diseño de redes de cadenas de suministro (SCND) y se contrasta su alcance. De este examen se desprende que abordar la viabilidad en SCND mediante una analogía con el sistema inmune integrada con técnicas de inteligencia artificial (IA) constituye una línea de estudio original y aún poco explorada.

Viabilidad en diseño de redes de cadenas de suministro (SCND)

La viabilidad en cadenas de suministro se entiende como la capacidad del sistema para sostenerse y perdurar en contextos cambiantes mediante el rediseño estructural y la replanificación del desempeño con impactos de largo plazo (Ivanov, 2021). A diferencia de los enfoques centrados en conservar estados estacionarios, la viabilidad subraya la adaptación continua de la red para garantizar su desempeño bajo interrupciones (Ivanov & Das, 2020). En esta línea, la naturaleza de la incertidumbre condiciona el lente de análisis: cuando las perturbaciones son conocidas o mensurables, la visión basada en estabilidad resulta adecuada; cuando predominan los "unknown-unknowns", la perspectiva de viabilidad ofrece una cobertura conceptual y operativa más amplia frente al abanico completo de eventos (Chervenkova &

Ivanov, 2023). Pese a estos avances, los estudios que tratan explícitamente la viabilidad bajo incertidumbre verdaderamente no anticipable siguen siendo escasos (Ramani *et al*., 2022), lo que evidencia la necesidad de marcos y modelos que integren mecanismos de adaptación estructural, aprendizaje y respuesta bajo condiciones extremas.

Metodologías usadas en estudios de viabilidad de cadenas de suministro

El campo de la viabilidad en SCND continúa madurando, por lo que aún predominan los desarrollos teóricos sobre las aplicaciones a gran escala. Dentro de los abordajes de modelación matemática, la programación lineal entera mixta (PLEM, sigla del nombre en inglés) se ha consolidado como metodología de referencia para problemas de diseño de red con múltiples restricciones y decisiones discretas (Abbasi *et al*., 2024; Gholian-Jouybari *et al*., 2024; Gilani & Sahebi, 2022; Kahr, 2022; Kumar & Kumar, 2024; Shiri *et al*., 2024; Tang *et al*., 2022). Para capturar no linealidades asociadas a economías de escala, costos dependientes del flujo o comportamientos de proceso, se recurre a la programación no lineal entera mixta (MINLP, sigla del nombre en inglés), ampliando el espacio de representación del fenómeno (Gilani & Sahebi, 2022; Lotfi *et al*., 2024; Ren *et al*., 2024). En paralelo, la simulación continua mediante la dinámica de sistemas (DS) ha ganado tracción para estudiar acumulaciones, demoras y bucles de retroalimentación característicos de redes logísticas sometidas a disrupciones (Ghadge *et al*., 2022a; Rozhkov *et al*., 2022). A partir de esta literatura reciente, surgen categorías que articulan dimensiones de viabilidad —resiliencia, sostenibilidad y agilidad— con el uso de técnicas de IA, enfoques de solución para SCND, manejo de incertidumbre, incorporación de conceptos del sistema inmune (SI) y validaciones en estudios de caso. Sin embargo, una lectura exhaustiva de dichos trabajos no identifica propuestas que diseñen redes viables integrando simultáneamente IA y analogía inmunológica, lo que sustenta el carácter novedoso del enfoque que aquí se plantea.

Analogía con el sistema inmune

La noción de viabilidad como propiedad dinámica, impulsada por la coevolución entre disrupciones y respuestas en sistemas abiertos, se fundamenta en paralelos con la biología (Ivanov & Dolgui, 2020). La investigación contemporánea ha revalorizado la funcionalidad integrada de los sistemas biológicos como fuente de principios de diseño (Wegener *et al*., 2023). En específico, el sistema inmune combina componentes preexistentes y adaptativos altamente interconectados (Srinivasan & Tew, 2017), susceptibles de ser reforzados mediante intervenciones externas como medicamentos o vacunas (Darmoul *et al*., 2013). Su evolución frente a patógenos ha producido un equilibrio entre eficacia y costo (de desarrollo, ejecución y mantenimiento) que inspira criterios de diseño eficientes en otros dominios (Khan *et al*., 2019; Y. Li *et al*., 2023). En términos metodológicos, el razonamiento analógico permite mapear conceptos de un dominio bien comprendido hacia otro que requiere ser explicado o replanteado (Zhang & Cheng, 2012).

Trasladado a cadenas de suministro, el primer nivel —barreras físicas— emula piel y membranas: políticas de inventario de seguridad y capacidad ociosa estratégica que reducen la probabilidad de falla sistémica (Wegener *et al*., 2023; Man *et al*., 2013; Khan *et al*., 2019). El segundo nivel —inmunidad innata— se vincula con detener la propagación de "patógenos logísticos" vía reconocimiento temprano de patrones y contención (Reed *et al*., 2024; Chervenkova & Ivanov, 2023), análogo a estrategias de variedad estructural, flexibilidad de procesos, redundancia y agilidad (Ivanov, 2024). La etapa en que un riesgo "rompe" las barreras (p. ej., un pico repentino de demanda) corresponde a la materialización del evento y su potencial efecto dominó (Srinivasan, 2010). El tercer nivel —inmunidad adaptativa— incorpora respuesta específica y memoria: la activación diferida de mecanismos (horas/días) que, una vez aprendidos, aceleran futuras reacciones (Khan *et al*., 2019; Y. Li *et al*., 2023;

Glas *et al*., 2021). En clave logística, esto se traduce en adaptación pasiva (absorción con capacidades innatas o planes predefinidos) y adaptación activa (medidas proactivas y reactivas durante o tras el impacto) (Ivanov, 2022). Aunque la resiliencia se reconoce como un concepto transversal —de lo subcelular al ecosistema— y aplicable a economía, ingeniería, redes de suministro y salud (Wegener *et al*., 2023; Reed *et al*., 2024), persiste una escasez de modelos conceptuales y formalizados de resiliencia de CS que se basen explícitamente en mecanismos inmunológicos (Ivanov, 2024). La extensión reciente del foco hacia la viabilidad incorpora niveles de supervivencia, redes entrelazadas y adaptación de red-de-redes, integrando capacidades como adaptabilidad, agilidad, flexibilidad y colaboración (Ivanov, 2022; Chervenkova & Ivanov, 2023).

Dinámica de sistemas (DS)

La dinámica de sistemas es una técnica de simulación determinista basada en ecuaciones diferenciales y un lenguaje visual que facilita representar estructuras de realimentación y demoras (Miao *et al*., 2017). Su fortaleza radica en explicar problemas que emergen de interacciones acumulativas, retardos y bucles en sistemas complejos (Goosby & Cheadle, 2024; Götz *et al*., 2024). En gestión de cadenas de suministro, la DS resulta especialmente útil en contextos de crisis por su capacidad para evaluar estados del sistema y apoyar decisiones con base en trayectorias simuladas (Mohammadi *et al*., 2022a). Tras identificar variables clave y relaciones causales, el modelo se formaliza matemáticamente para obtener resultados cuantitativos y reproducibles (Izadi *et al*., 2023).

La literatura reciente revisada muestra una amplia diversidad sectorial —desde transiciones energéticas hasta agroindustrias— y una cobertura alta de disrupciones (≈ 89,5 % de los modelos), incluyendo choques de demanda y oferta, fallas de transporte, paros de nodos, crisis políticas o pandemias como el Covid-19. En cuanto a capacidades de viabilidad, los trabajos han enfatizado sostenibilidad (36,8 %) y, en menor medida, resiliencia y colaboración (26,3 % cada una), mientras que agilidad y flexibilidad aparecen poco exploradas. Respecto a la inmunidad, prácticamente todos los estudios incorporan alguna estrategia de mitigación, pero con baja variedad: el 94,7 % recurre a inventarios de seguridad como medida principal. Existen, no obstante, señales de diversificación: capacidad adaptable de recursos productivos frente a variaciones de insumos (Taheri *et al*., 2024) y aprendizaje por refuerzo para descubrir políticas de pedido robustas sin depender de grandes históricos (Bussieweke *et al*., 2024). Esta evidencia refuerza la oportunidad de integrar, de forma más explícita y sistemática, principios inmunológicos y técnicas de IA en marcos de diseño viable con validación por simulación.

Materiales y métodos

El presente estudio desarrolla un caso aplicado para evaluar un enfoque viable y resiliente de la cadena de suministro en un contexto real del sector agroindustrial de la panela. La planificación empresarial opera bajo condiciones cambiantes: metas de ventas, competitividad y sostenibilidad, al tiempo que enfrenta variaciones de demanda y restricciones operativas en el suministro de caña, almacenamiento y transporte, con efectos directos sobre costos, emisiones de CO_2 y nivel de servicio. Dadas estas características, se adopta la dinámica de sistemas (DS) como metodología de análisis y la plataforma Stella para la construcción y simulación de escenarios.

Modelo de dinámica de sistemas

El diagrama causal propuesto (figura 1) integra cuatro bucles de realimentación y tres bucles de balance. Cuando ocurre una interrupción del transporte —por fallas logísticas, clima adverso o bloqueos viales— los tiempos de entrega de caña y derivados se alargan. Este retraso reduce los inventarios en destino, limitando la capacidad de atender pedidos a tiempo y degradando el nivel de servicio, con posibles pérdidas de ventas e impacto reputacional. Este bucle de balance muestra cómo

un problema de transporte desencadena efectos adversos a lo largo de la red.

La disminución del nivel de servicio, producto de demoras e incumplimientos, genera insatisfacción y puede inducir a los clientes a reducir compras futuras o migrar a otros proveedores, lo cual contrae la demanda esperada. A la inversa, un aumento de la demanda reduce inventarios y activa órdenes adicionales de producción; con ello, se incrementa el procesamiento de caña y la fabricación de panela hasta restablecer el equilibrio entre oferta y demanda. Si la reposición tarda o la caída de inventario es pronunciada, el nivel de servicio vuelve a deteriorarse, con riesgo de pérdida de clientes. Este bucle de balance busca estabilizar el sistema ajustando la producción ante fluctuaciones, por lo que la resiliencia depende de reaccionar con rapidez, sostener inventarios óptimos y preservar un servicio alto.

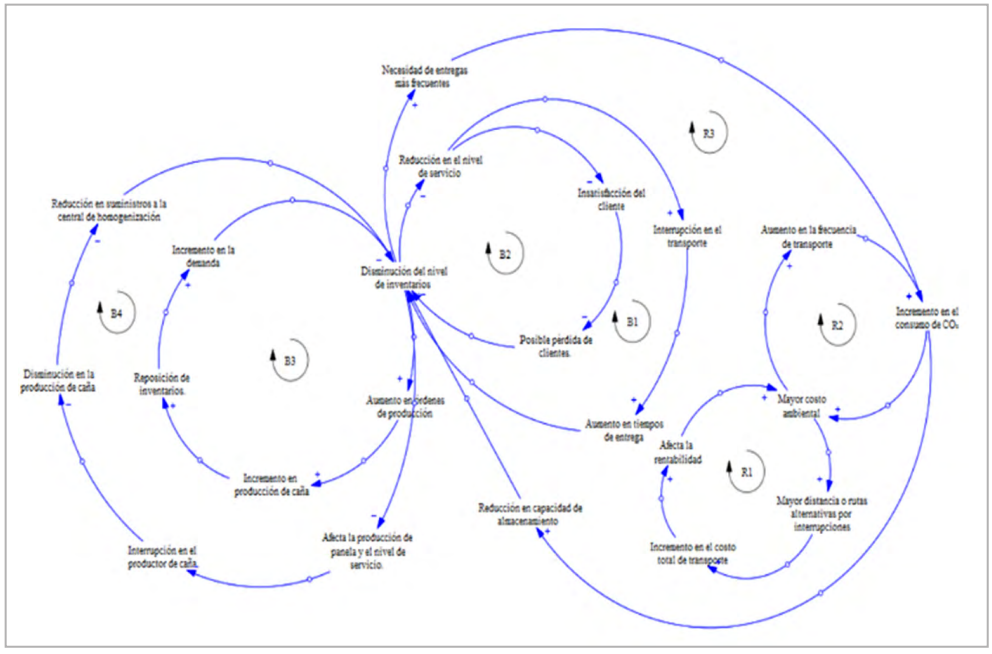

Figura 1. Diagrama causal para la cadena de suministro de la panela.

Cuando la interrupción ocurre aguas arriba, en el productor de caña —por clima, contingencias laborales u otros imprevistos— la disponibilidad de materia prima disminuye. Esto reduce el abastecimiento hacia la central de homogenización y contrae los inventarios procesables, afectando el ritmo de producción de panela y deteriorando el nivel de servicio (retrasos, faltantes, insatisfacción). El bucle de retroalimentación negativa evidencia el efecto dominó de un choque agrícola y subraya la necesidad de diversificar proveedores, mantener inventarios de seguridad y contar con planes de contingencia para sostener el servicio.

El incremento de la frecuencia de transporte —por entregas más pequeñas o limitaciones de almacenamiento— eleva el consumo de CO_2 y los costos asociados al mayor uso de combustible y activos, afectando la sostenibilidad y la rentabilidad. Además, las rutas alternativas impuestas por interrupciones pueden ser más largas o menos

eficientes, incrementando distancias y tiempos, y elevando el costo total de transporte con potencial traslado al precio final. Este bucle de refuerzo ilustra cómo decisiones logísticas y disrupciones impactan simultáneamente el desempeño ambiental y financiero. Para preservar la resiliencia, es clave optimizar rutas, evitar viajes innecesarios y adoptar prácticas más sostenibles que reduzcan emisiones y costos.

La reducción de la capacidad de almacenamiento limita el inventario máximo y obliga a aumentar la frecuencia de abastecimiento de materias primas o despachos de producto terminado. Ello eleva costos operativos (combustible, mantenimiento) y el consumo de CO_2 por mayor utilización de vehículos.

Eslabones de la cadena de suministro

Productor de caña convencional. Por cada planta de procesamiento (trapiche) operan aguas arriba entre tres y cinco predios. El ciclo de cultivo se extiende de doce a dieciocho meses y se maneja por lotes para asegurar cosechas mensuales y flujo de caja continuo. Este eslabón es sensible a variaciones climáticas que afectan rendimientos y procesos, así como a la calidad de las prácticas agronómicas. En épocas de lluvia pueden verse comprometidas cosecha y productividad. Las entradas típicas son: semilla, insumos, conocimiento y mano de obra; la salida es: caña madura o tallos molinables que alimentan la etapa de transformación. La demanda de caña está impulsada por órdenes de compra y por la ventana óptima de cosecha definida por el estado vegetativo del cultivo (figura 2).

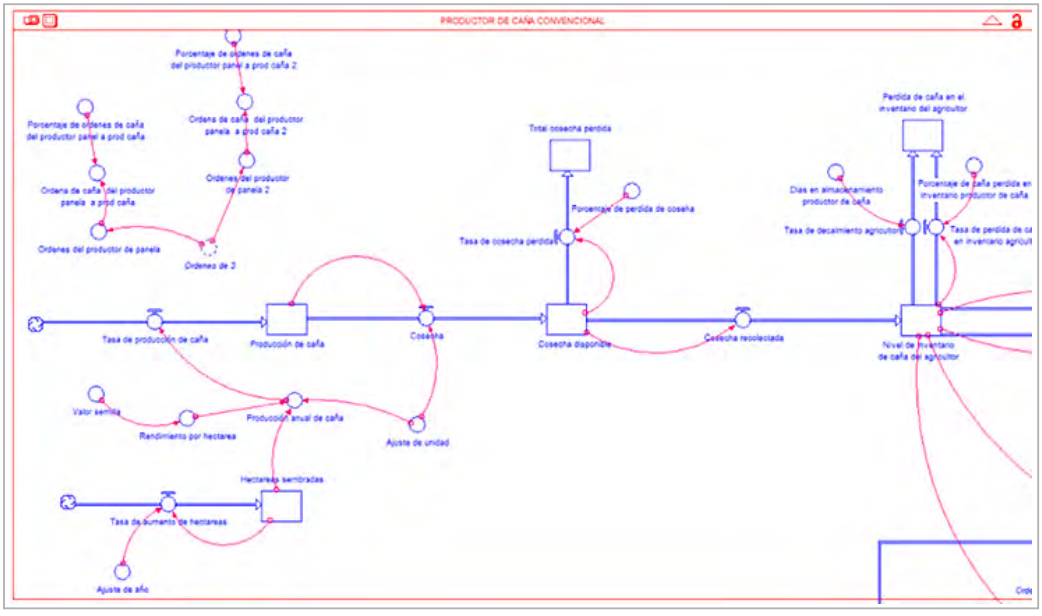

Figura 2. Diagrama causal en el eslabón de producción de caña en cultivo convencional.

Productor de caña orgánica. Comparte la estructura aguas arriba (tres a cinco predios por trapiche) y el ciclo de doce a dieciocho meses, con prácticas certificadas que habilitan el acceso a mercados diferenciados. Se gestiona por lotes para sostener cosechas mensuales y flujo de caja.

Enfrenta las mismas vulnerabilidades climáticas y de manejo. Recibe semilla, insumos y trabajo, y entrega caña madura o tallos molinables. La demanda para procesamiento depende, nuevamente, de las órdenes de compra y del momento agronómico oportuno (figura 3).

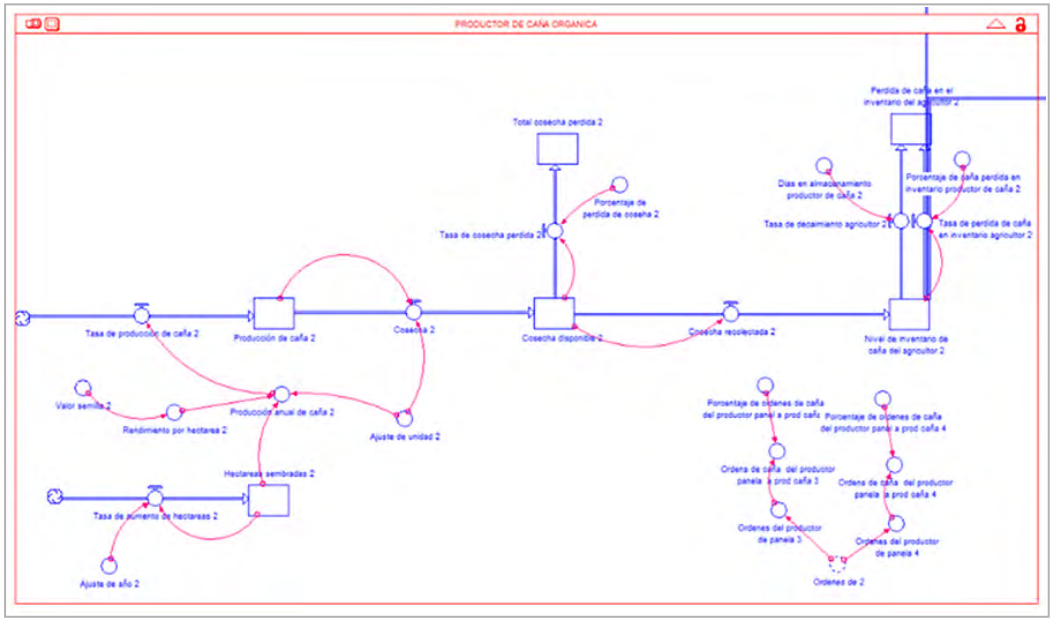

Figura 3. Diagrama causal en el eslabón de producción de caña en cultivo orgánico.

Productor de panela (trapiche). Efectúa la transformación en tres subprocesos: extracción del jugo, evaporación y concentración para obtener panela en bloque o granulada. El bagazo de caña se emplea como fuente energética. La panela en bloque se remite a un centro de adecuación y empaque; la granulada, al centro de empaque de la empresa ancla. El insumo principal es caña madura, y los productos son panela en bloque o granulada. El procesamiento suele tomar entre cuatro y seis días, con corridas cada dos o tres semanas. En una variante, puede producirse miel virgen (65-70 °Brix) como producto final intermedio, que se envía a homogenización y concentración para elaborar panela en bloque o pulverizada; la obtención de miel tarda de dos a cuatro días (figura 4).

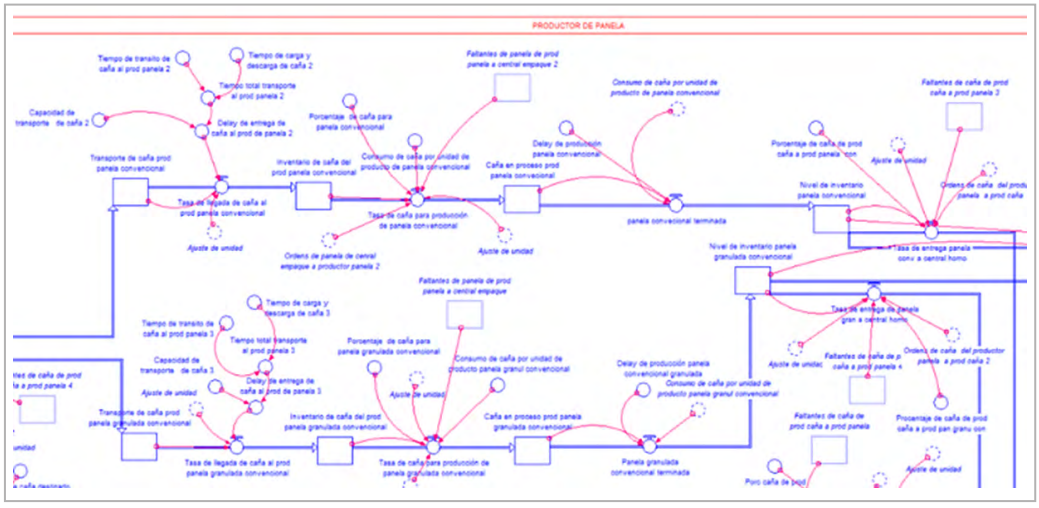

Figura 4. Diagrama causal en el eslabón de producción de panela (trapiches).

Centro de empaque (figura 5). Recibe panela en bloque desde trapiches para consolidar, asegurar inocuidad y preparar pedidos mediante clasificación, selección, limpieza y empaque. La entrada es panela a granel sin seleccionar; la salida es panela empacada, clasificada y rotulada conforme a las órdenes de los clientes. Para exportación, la entrega se realiza en la planta de la empresa ancla; para mercado nacional, típicamente se despacha a distribuidores sin pasar por bodegas del cliente. El ciclo de esta etapa dura entre cuatro y seis días, según capacidad. Un Centro de Distribución Logística (CEDI) puede integrar de quince a veinte trapiches, de los cuales entre cuatro y siete despachan cada semana, en rotación según el plan de producción.

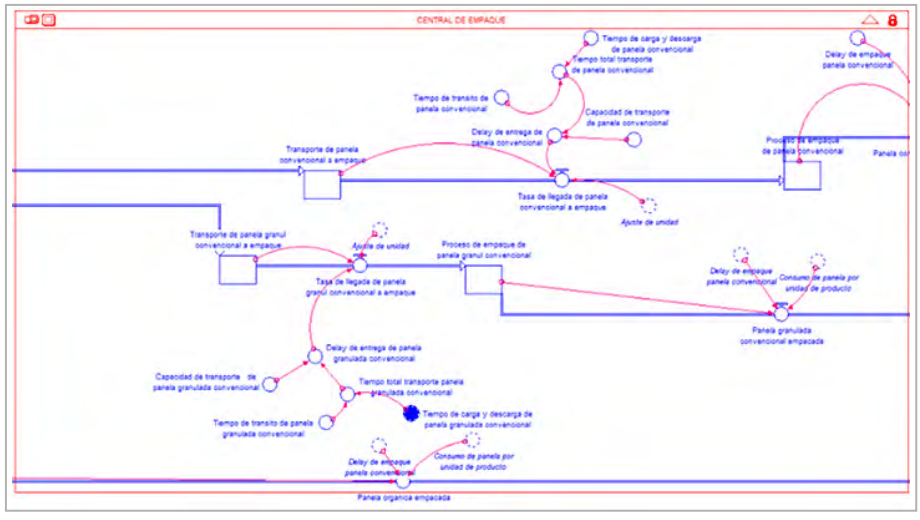

Figura 5. Diagrama causal en el eslabón del centro de empaque.

Central de homogenización. Esta etapa, introducida recientemente en Colombia y presente en el caso de estudio en dos departamentos, surge como reconfiguración para elevar la calidad y la inocuidad mediante la integración de múltiples plantas de miel (trapiches) usualmente de baja capacidad. Permite producir panela con estándares superiores, aunque con incrementos de precio, orientada a mercados de valor agregado (exportación e industria de alimentos). La materia prima es miel virgen y el producto final, predominantemente, panela granulada (más del 90 %); bajo solicitud de la empresa ancla puede elaborarse panela en bloque (menos del 10 %). El procesamiento toma de cuatro a seis días. Estas centrales pueden articular desde treinta hasta más de cien trapiches; semanalmente reciben miel de ocho a quince plantas, según el plan y los pedidos. En la actualidad operan por debajo del 30 % de su capacidad instalada, con posibilidad de escalar, en la medida en que se consoliden mercados de mayor valor (figura 6).

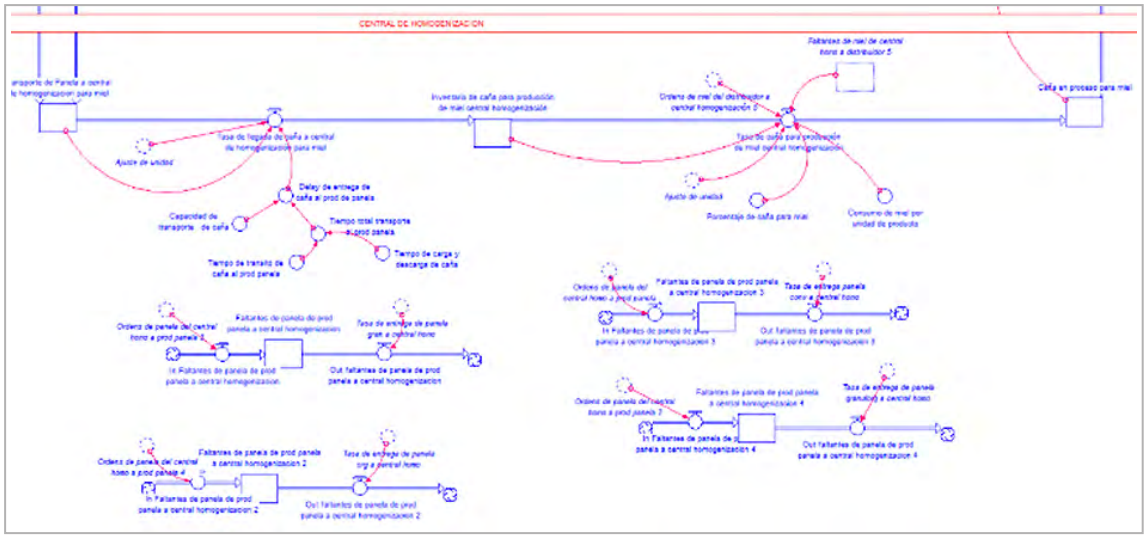

Figura 6. Diagrama causal en el eslabón de la central de homogenización.

Resultados

Escenario 1: cadena actual

En el escenario base se observa el funcionamiento de referencia de la red panelera bajo condiciones normales, sin disrupciones relevantes ni alteraciones de la demanda. Esta línea de base permite comparar el desempeño frente a los demás escenarios de variabilidad y choque. Los eslabones —productores de caña convencional y orgánica, trapiches, central de homogenización, centro de empaque y distribución— operan de manera coordinada, de modo que producción, procesamiento, almacenamiento y transporte fluyen sin fricciones. La política de inventarios es consistente con los requerimientos de cada etapa: se sostienen niveles óptimos que evitan tanto escasez como acumulaciones innecesarias, preservando la estabilidad operativa y el cumplimiento oportuno de los pedidos. Los resultados de niveles de inventario de caña en los diferentes productores pueden observarse en la figura 7.

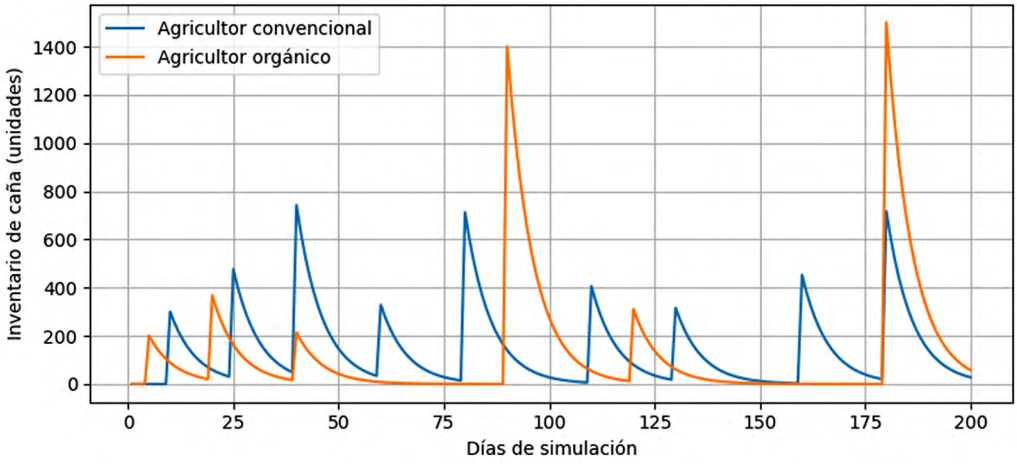

Figura 7. Nivel de inventario de caña en productor convencional y orgánico en escenario actual.

Escenario 2: interrupciones en la producción del eslabón agrícola

Cuando la producción de caña se ve comprometida —por inundaciones, sequías prolongadas u otras contingencias— se reduce la disponibilidad de materia prima y se agotan los inventarios aguas arriba. Esta contracción impacta el abastecimiento a centrales de homogenización y plantas de proceso, disminuye la fabricación de panela y genera desabastecimientos de producto terminado. En consecuencia, el nivel de servicio se deteriora por retrasos y faltantes, con efectos sobre la satisfacción del cliente y riesgos contractuales. La resiliencia del sistema depende de la capacidad para amortiguar el choque mediante diversificación de proveedores, inventarios de seguridad y flexibilidad en producción y transporte; sin estas salvaguardas, la red entra en zona crítica, con una caída marcada del servicio y el aumento de costos (figura 8).

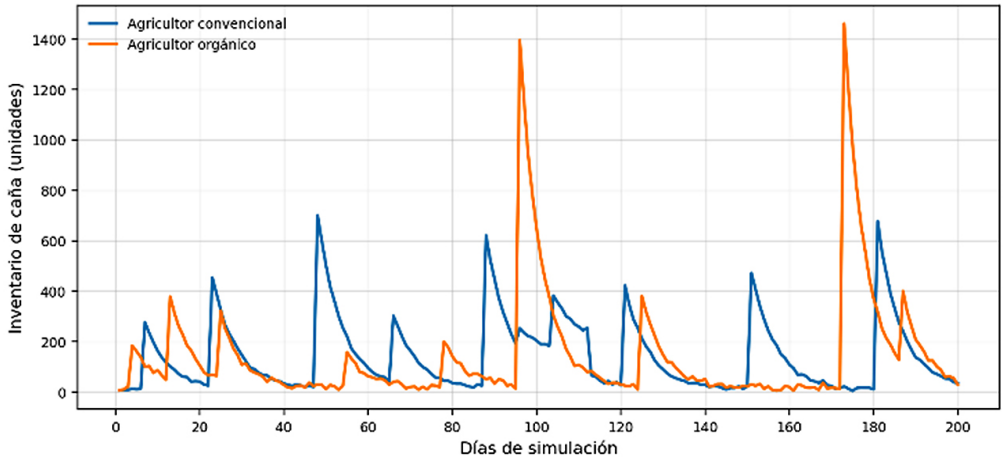

Figura 8. Nivel de inventario de caña tras interrupción en el eslabón del cultivo.

Escenario 3: interrupciones en el transporte en el eslabón del agricultor

Este escenario se centra en las dificultades para movilizar la caña desde los predios hacia la central de homogenización y los eslabones subsecuentes, debido a una infraestructura vial deficiente, fallas de flota o condiciones climáticas adversas. La disrupción impide entregas a tiempo y provoca efectos cascada: en la central disminuye con rapidez la disponibilidad de insumos (p. ej., miel virgen) para mantener un ritmo de producción estable; en los trapiches y predios se acumula caña sin evacuar, con riesgo de pérdidas si no se transporta oportunamente. El nivel de servicio (figura 9) se ve severamente afectado al no poder sostener la producción de panela y las entregas finales. Además, el costo logístico y el consumo de CO_2 se incrementan cuando deben activarse rutas alternativas, servicios más costosos o medidas de urgencia para restablecer el flujo desde origen.

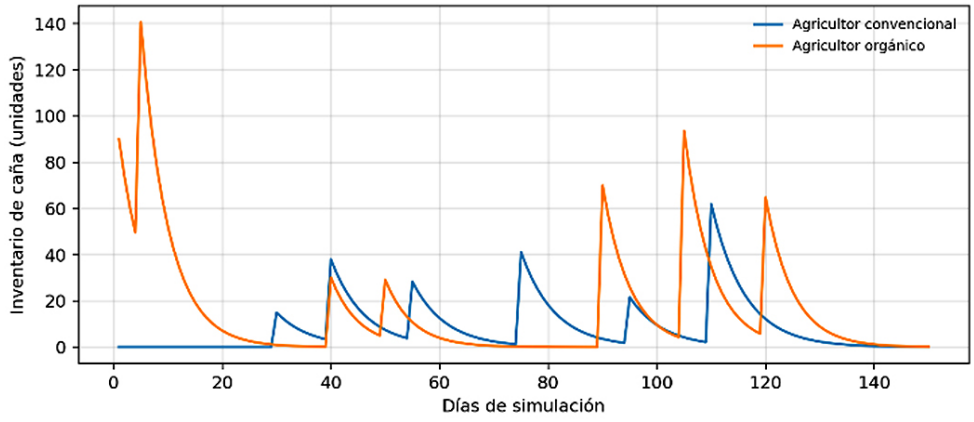

Figura 9. Nivel de inventario de caña tras afectación del transporte.

Escenario 4: incremento de la demanda

Se evalúa un aumento abrupto y significativo del consumo de productos de panela. La presión de mercado acelera la salida de inventarios de producto terminado y empaques; en esta medida, si la capacidad de respuesta productiva no acompasa el salto en pedidos, los stocks en distribuidores y puntos de venta se agotan, lo que genera demoras y faltantes. La tensión se propaga a lo largo de la red, desde la planificación de cosecha en finca hasta el despacho final, y así se pone a prueba la sincronización entre producción, almacenamiento y distribución (figura 10).

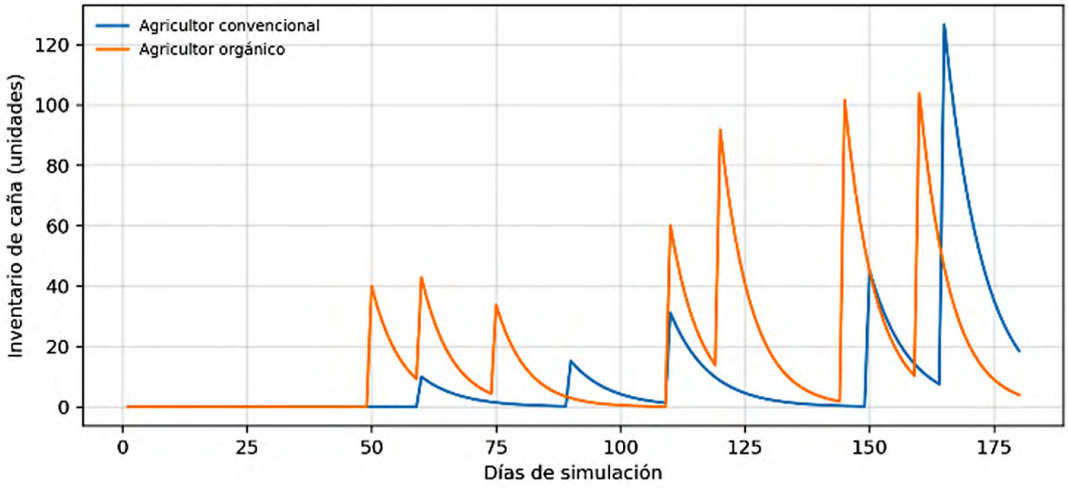

Figura 10. Nivel de inventario de caña tras afectación por el incremento de la demanda.

Escenario 5: reducción de la capacidad de almacenamiento

Aquí se simula una restricción de espacio para guardar tanto insumos procesados, como panela terminada en los trapiches o centros afines, restricción motivada por limitaciones de infraestructura. Con menor capacidad de acopio, la operación requiere entregas más frecuentes para sostener el flujo, lo que eleva costos de transporte, uso de combustible y, por ende, el consumo de CO_2. La falta de espacio puede obligar a ralentizar o detener la producción para evitar acumulaciones no gestionables, lo cual crea cuellos de botella que repercuten en inventarios aguas abajo. Como resultado, el nivel de servicio se resiente por retrasos en la preparación y entrega de pedidos, y el costo logístico total puede aumentar si se recurre a despachos adicionales o soluciones de emergencia para compensar la restricción de almacenamiento. La tabla 1 muestra las medidas de desempeño establecidas para evaluar la cadena de suministro de la panela.

Tabla 1. Medidas de desempeño

Medidas de desempeño	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Costo total de transporte	$ 39.215.614	$ 28.988.685	$ 49.001.042	$ 22.071.683	$ 105.124.333
Nivel de servicio	0.867	0.543	0.746	0.996	0.930
Nivel de inventario de caña del agricultor convencional	14.07	4.82	9.35	11.48	2.58

Nivel de inventario de caña del agricultor orgánico	19.28	20.68	22.58	20.10	17.01
Nivel de inventario de miel	223.11	38.91	171.23	36.05	377.52
Nivel de inventario de panela convencional	5.13	0.39	2.85	0.26	6.25
Nivel de inventario de panela granulada convencional	5.45	1.84	2.24	0.52	6.49
Nivel de inventario de panela granulada orgánica	1.57	0.72	1.36	1.33	0.15
Nivel de inventario de panela orgánica	1.60	0.75	1.39	1.60	1.38
Nivel de inventario promedio cadena	30.69	20.71	33.33	33.30	42.20

Fuente: elaboración propia.

Discusión

En el eslabón del productor de panela, la analogía con las células B se traduce en la capacidad de reaccionar con rapidez ante amenazas y paradas del proceso. Así como estas células responden velozmente a patógenos, el productor necesita mecanismos listos para enfrentar cambios inesperados, desde la variabilidad climática y escasez de insumos hasta las contingencias laborales.

La redundancia pasiva aparece como la disponibilidad de recursos de respaldo: equipos alternos propios o de la vecindad para colaboración horizontal, y monitoreo del estado de las cañas listas para moler que no forman parte del plan ordinario, pero pueden activarse en emergencia. Con ello, un fallo de maquinaria o un bache en el suministro no detiene la operación, preservando la continuidad productiva.

El inventario de mitigación actúa como un "anticuerpo" frente a fluctuaciones de demanda o problemas de abastecimiento. Considerando la vida útil de la panela (aproximadamente, 120-180 días, según el tipo), gestionar ese stock de forma eficiente permite sostener el flujo incluso cuando ocurren interrupciones, aprovechando la durabilidad del producto para amortiguar choques.

Las capacidades innatas del productor corresponden a los recursos y saberes disponibles para operar en condiciones normales sin medidas extraordinarias: conocimientos tradicionales, uso eficiente de recursos naturales y cumplimiento de la demanda diaria. Estas capacidades sostienen una operación estable en contextos estándar.

Si el entorno cambia de forma abrupta, se activan los planes de contingencia: estrategias previamente diseñadas para enfrentar eventos críticos como fenómenos climáticos, faltantes de insumos o cuellos de botella logísticos. Tales planes permiten ajustar la producción y reducir el impacto de la disrupción, de modo que la operación continúe aun en escenarios adversos.

En el productor de caña, tanto convencional como orgánico, la inmunidad adaptativa se refleja en la capacidad de ajustar prácticas productivas y logísticas ante disrupciones recurrentes o nuevas. Aprender de experiencias previas habilita las estrategias que evitan impactos persistentes en producción y suministro.

La función análoga a las células T asesinas se materializa en acciones concretas y decisivas para eliminar problemas que amenazan la producción. En caña convencional, esto incluye adoptar insumos que eleven productividad, prácticas de agricultura regenerativa para mejorar nutrientes y retención de humedad, mecanización para facilitar labores y esquemas de colaboración horizontal para reconfigurar la cadena. En caña orgánica, las respuestas se orientan a soluciones naturales: control biológico de plagas, manejo agroecológico y procesos compatibles con certificaciones.

La adaptación sostenida para suprimir interrupciones implica cambios persistentes en el tiempo que aumentan la resiliencia ante problemas repetitivos. Para el productor convencional, puede significar mayor mecanización o diversificación de cultivos; en el ámbito orgánico, significa optimizar prácticas regenerativas, diversificar fuentes de nutrientes y fortalecer alianzas con certificadores. Con estas medidas, tanto productores convencionales como orgánicos mantienen la operación sin pausas significativas y robustecen la "inmunidad" de sus eslabones.

En la cadena convencional, la adaptabilidad es más elevada gracias a la mayor disponibilidad de equipos, insumos y personal. Los productores pueden escalar o desacelerar la producción con rapidez, y los distribuidores, al operar con sistemas más industrializados, reconfiguran sus procesos logísticos con mayor flexibilidad. Además, la presencia de inventarios de seguridad en cada eslabón amortigua las variaciones de la demanda y sostiene la continuidad del flujo de productos.

El Índice de Resiliencia de la Cadena de Suministro (SCRI, sigla del nombre en inglés) evalúa hasta qué punto una red logra conservar su eficiencia (costos) y su efectividad (nivel de servicio) frente a disrupciones o picos de demanda (tabla 2). Para estimarlo en este estudio, se consideraron dos componentes principales: el nivel de servicio y los costos de transporte en diferentes escenarios. El Nivel de Servicio Expectativo (SLE, sigla del nombre en inglés) expresa el grado de cumplimiento en entregas completas y a tiempo. El valor ideal es 1 (100 %). Ahora, el error de servicio (1 - SLE) representa la distancia respecto al desempeño perfecto: cuanto menor sea el SLE, mayor será este error.

Tabla 2. Índice de resiliencia en diferentes escenarios

Escenario	Nivel de servicio (SLE)	Error en nivel de servicio (SLE_error)	Costo de transporte (TC)	Costo normalizado	SCRI
Cadena actual	0.867373	0.132627	$ 39.215.610	0.392156	0.948
Interrupción en la producción	0.54274	0.45726	28.988.690	0.289887	0.867

Interrupción en el transporte	0.745954	0.254046	49.001.040	0.49001	0.876
Incremento de la demanda	0.996225	0.003775	22.071.680	0.220717	0.999
Disminución de la capacidad de almacenamiento	0.93002	0.06998	$ 105.124.300	$ 1.051.243	0.926

Fuente: elaboración propia.

Conclusión

Se plantea un modelo de dinámica de sistemas para estudiar la resiliencia de la cadena panelera bajo la implementación de inventarios de mitigación y redundancia pasiva. Los escenarios permiten derivar políticas para mejorar la gestión de existencias, optimizar el transporte y reducir los costos asociados a disrupciones en producción y distribución. No obstante, la efectividad de estas medidas no es homogénea entre eslabones: el productor de caña puede resultar especialmente expuesto por la vida útil limitada del producto, los retrasos logísticos y la volatilidad de la demanda, factores que elevan la complejidad operativa, generan cuellos de botella y deterioran la capacidad de respuesta y la precisión de entrega.

La vulnerabilidad más marcada aparece en el eslabón agrícola. En el escenario de interrupción del agricultor, el nivel de servicio cae a 0,543, lo cual evidencia la dependencia crítica de los insumos iniciales y el consiguiente efecto dominó sobre procesamiento, homogenización, empaque y distribución. Para contrarrestar esta fragilidad se requiere diversificar proveedores, establecer inventarios de seguridad en puntos críticos y verificar la agilidad de los planes de contingencia y la capacidad de reacción del productor. Las reservas estratégicas de caña (convencional y orgánica) y la incorporación de tecnologías de monitoreo de cultivo pueden anticipar y mitigar estos eventos, para así estabilizar el desempeño de la red.

El costo total de transporte varía de forma notable entre escenarios y condiciona la eficiencia global. Cuando se reduce la capacidad de almacenamiento, el gasto logístico alcanza su máximo (USD 105.124.333), una señal de ineficiencia severa: la limitación de espacio obliga a aumentar la frecuencia de movimientos y a usar recursos adicionales. Este comportamiento confirma la dependencia de una infraestructura de acopio adecuada para mantener costos estables. La falta de capacidad crea cuellos de botella que interrumpen el flujo continuo y restan capacidad de respuesta ante cambios de demanda. Por ende, resulta prioritario optimizar el uso del almacenamiento mediante automatización y mejor coordinación logística, para disminuir costos de transporte y mejorar la oportunidad de las entregas, fortaleciendo así la resiliencia.

El escenario de aumento de demanda revela el mayor desempeño resiliente: nivel de servicio de 0,996 y el costo de transporte más bajo (USD 22.071.683). La red muestra flexibilidad para absorber picos sin comprometer el servicio, lo que sugiere una preparación adecuada en producción y distribución. Mantener altos niveles de servicio en estos contextos sustenta la competitividad y la satisfacción del cliente. La planificación con inventarios de seguridad, sumada a tecnologías predictivas para anticipar la demanda y a la coordinación en tiempo real con proveedores y distribuidores, potencia esta capacidad de adaptación.

Las disrupciones de transporte provocan una reducción marcada del inventario de caña convencional (9,35), afectando directamente la fabricación de panela y desbalanceando el flujo a

lo largo de la red, con retrasos en entregas finales. Este resultado subraya la necesidad de planificar inventarios de seguridad adecuados y de contar con medidas preventivas que aseguren continuidad operativa. Sistemas de gestión de inventarios en tiempo real, contratos con múltiples transportistas y planes de contingencia más robustos mejoran la agilidad y estabilizan la operación ante variaciones del stock.

La restricción de almacenamiento impacta de forma profunda el desempeño. En el escenario de disminución de capacidad, el inventario promedio de la cadena asciende a 42,20, señal de acumulaciones que no se distribuyen con eficiencia y que enlentecen la producción y el servicio al cliente. Mantener niveles elevados del stock por falta de espacio incrementa costos operativos y reduce la eficiencia global. La combinación de almacenamiento automatizado, una planificación de demanda más precisa y la expansión de capacidad (propia o mediante acuerdos con terceros) permite sostener un flujo continuo y responder mejor frente a picos o interrupciones.

El inventario de mitigación resulta decisivo, especialmente para la panela orgánica. En el escenario de incremento de demanda, el stock de panela granulada orgánica escala a 118,22, demostrando el valor de reservas suficientes para absorber fluctuaciones sin sacrificar servicio ni disparar costos de transporte y almacenamiento. La definición de existencias estratégicas en todos los eslabones asegura continuidad productiva y distributiva aun con fallas de suministro de caña o incidencias logísticas. Tecnologías de monitoreo de inventarios que anticipen reabastecimientos ayudan a dimensionar esas reservas y a cubrir oportunamente los picos de demanda.

Referencias

Abbasi, S., Abbaspour, S., Eskandari Nasab Siahkoohi, M., Yousefi Sorkhi, M., & Ghasemi, P. (2024). Supply chain network design concerning economy and environmental sustainability: Crisis perspective. *Results in Engineering, 22*. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102291

Anderson, J. D., Mitchell, J. L., & Maples, J. G. (2021). Lessons from the Covid-19 pandemic for food supply chains. *Applied Animal Science, 37*(6), 738-747. https://doi.org/10.15232/aas.2021-02223

Balezentis, T., Zickiene, A., Volkov, A., Streimikiene, D., Morkunas, M., Dabkiene, V., & Ribasauskiene, E. (2023). Measures for the viable agri-food supply chains: A multi-criteria approach. *Journal of Business Research, 155*. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113417

Barman, A., Das, R., & De, P. K. (2021). Impact of Covid-19 in food supply chain: Disruptions and recovery strategy. *Current Research in Behavioral Sciences, 2*, 100017. https://doi.org/10.1016/j.crbeha.2021.100017

Bassett, H. R., Lau, J., Giordano, C., Suri, S. K., Advani, S., & Sharan, S. (2021). Preliminary lessons from Covid-19 disruptions of small-scale fishery supply chains. *World Development, 143*, 105473. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105473

Bussieweke, F., Mula, J., & Campuzano-Bolarin, F. (2024). Optimisation of recovery policies in the era of supply chain disruptions: a system dynamics and reinforcement learning approach. *International Journal of Production Research, 63*(5), 1649-1673. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2383293

Chervenkova, T., & Ivanov, D. (2023). Adaptation strategies for building supply chain viability: A case study analysis of the global automotive industry re-purposing during the Covid-19 pandemic. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 177*. https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103249

Dai, Z. (2016). Multi-objective fuzzy design of closed-loop supply chain network considering risks and environmental impact. *Human and Ecological Risk Assessment, 22*(4), 845-873. https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1113852

Darmoul, S., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2013). Handling disruptions in manufacturing systems: An immune perspective. Engineering *Applications of Artificial Intelligence, 26*(1), 110-121. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.09.021

Esmaeili-Najafabadi, E., Azad, N., & Saber Fallah Nezhad, M. (2021). Risk-averse supplier selection and order allocation in the centralized supply chains under disruption risks. *Expert Systems with Applications, 175*, 114691. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114691

Ghadge, A., Er, M., Ivanov, D., & Chaudhuri, A. (2022). Visualisation of ripple effect in supply chains under long-term, simultaneous disruptions: a system dynamics approach. *International Journal of Production Research, 60*(20), 6173-6186. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987547

Gholian-Jouybari, F., Hajiaghaei-Keshteli, M., Smith, N. R., Calvo, E. Z. R., Mejía-Argueta, C., & Mosallanezhad, B. (2024). An in-depth metaheuristic approach to design a sustainable closed-loop agri-food supply chain network. *Applied Soft Computing, 150*. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111017

Gilani, H., & Sahebi, H. (2022). A data-driven robust optimization model by cutting hyperplanes on vaccine access uncertainty in Covid-19 vaccine supply chain. *Omega, 110*. https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102637

Glas, A. H., Meyer, M. M., & Eßig, M. (2021). Covid-19 attacks the body of purchasing and supply management: A medical check of the immune system. *Journal of Purchasing and Supply Management, 27*(4). https://doi.org/10.1016/j.pursup.2021.100716

Goosby, B. J., & Cheadle, J. E. (2024). The Immune System Is a Complex System: Inflammatory Morbidity and Systemic Racism. *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, 76*, 713-744. https://doi.org/10.1007/s11577-024-00952-4

Götz, P., Auping, W. L., & Hinrichs-Krapels, S. (2024). Contributing to health system resilience during pandemics via purchasing and supply strategies: an exploratory system dynamics approach. *BMC Health Services Research, 24*(1). https://doi.org/10.1186/s12913-023-10487-7

Ivanov, D. (2021). Supply Chain Viability and the Covid-19 pandemic: a conceptual and formal generalisation of four major adaptation strategies. *International Journal of Production Research, 59*(12), 3535-3552. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1890852

Ivanov, D. (2022). Viable supply chain model: integrating agility, resilience and sustainability perspectives—lessons from and thinking beyond the Covid-19 pandemic. *Annals of Operations Research, 319*(1), 1411-1431. https://doi.org/10.1007/s10479-020-03640-6

Ivanov, D. (2024). Supply chain resilience: Conceptual and formal models drawing from immune system analogy. *Omega, 127*. https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103081

Ivanov, D., & Das, A. (2020). Coronavirus (Covid-19/SARS-CoV-2) and supply chain resilience: A research note. *International Journal of Integrated Supply Management, 13*(1), 90-102. https://doi.org/10.1504/IJISM.2020.107780

Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by Covid-19 outbreak. *International Journal of Production Research, 58*(10), 2904-2915. https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1750727

Izadi, E., Nikbakht, M., Feylizadeh, M. R., & Shahin, A. (2023). A system dynamics model in the humanitarian supply chain based on blockchain technology. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 96*. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103977

Kahr, M. (2022). Determining locations and layouts for parcel lockers to support supply chain viability at the last mile. *Omega, 113*. https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102721

Khan, Z. A., Khan, M. T., Ul Haq, I., Iqbal, J., & Tufail, M. (2019). Human immune system inspired framework for disruption handling in manufacturing Process. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 32*(11), 1081-1097. https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1686174

Kumar, A., & Kumar, K. (2024). An uncertain sustainable supply chain network design for regulating greenhouse gas emission and supply chain cost. *Cleaner Logistics and Supply Chain, 10*. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100142

Li, Y., Xue, Y., Peng, Z., & Zhang, L. (2023). Immune diversity in lophotrochozoans, with a focus on recognition and effector systems. *Computational and Structural Biotechnology Journal, 21*, 2262-2275. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2023.03.031

Li, Z., Zhao, P., & Han, X. (2022). Agri-food supply chain network disruption propagation and recovery based on cascading failure. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 589*, 126611. https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126611

Liu, H., Li, Y., Bai, Z., & Wang, Y. (2023). SMFM-based analogy retrieval tool for the conceptual design of innovative products. *Computers in Industry, 151*. https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103973

Lotfi, R., Hazrati, R., Aghakhani, S., Afshar, M., Amra, M., & Ali, S. S. (2024). A data-driven robust optimization in viable supply chain network design by considering Open Innovation and Blockchain Technology. *Journal of Cleaner Production, 436*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140369

Loxton, M., Truskett, R., Scarf, B., Sindone, L., Baldry, G., & Zhao, Y. (2020). Consumer Behaviour during Crises: Preliminary Research on How Coronavirus Has Manifested Consumer Panic Buying, Herd Mentality, Changing Discretionary Spending and the Role of the Media in Influencing Behaviour. *Journal of Risk and Financial Management, 13*(8), 13080166. https://doi.org/10.3390/jrfm13080166

MacCarthy, B. L., Ahmed, W. A. H., & Demirel, G. (2022). Mapping the supply chain: Why, what and how? *International Journal of Production Economics, 250*. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108688

Man, M., Liu, S., Chang, X., & Lu, M. (2013). The biological property of synthetic evolved digital circuits with ESD immunity — redundancy or degeneracy? *Journal of Bionic Engineering, 10*(3), 396-403. https://doi.org/10.1016/S1672-6529(13)60235-8

Miao, S., Wang, T., & Chen, D. (2017). System dynamics research of remanufacturing closed-loop supply chain dominated by the third party. *Waste Management and Research, 35*(4), 379-386. https://doi.org/10.1177/0734242X16684384

Mohammadi, M. A., Sayadi, A. R., Khoshfarman, M., & Husseinzadeh Kashan, A. (2022). A systems dynamics simulation model of a steel supply chain-case study. *Resources Policy, 77*. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102690

Najafi, M., Zolfagharinia, H., Rostami, S., & Rafiee, M. (2024). Enhancing supply chain resilience facing partial and complete disruptions: The application in the cooking oil industry. *Applied Mathematical Modelling, 131*, 253-287. https://doi.org/10.1016/j.apm.2024.04.013

Ozdemir, D., Sharma, M., Dhir, A., & Daim, T. (2022). Supply chain resilience during Covid-19 pandemic. *Technology in Society, 68*, 101847. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101847

Phillips, J., Durand-Morat, A., Nalley, L. L., Graterol, E., Bonatti, M., Loaiza de la Pava, K., Urioste, S., & Yang, W. (2024). Understanding demand for broken rice and its potential food security implications in Colombia. *Journal of Agriculture and Food Research, 15*. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100884

Queiroz, M. M., Ivanov, D., Dolgui, A., & Fosso Wamba, S. (2020). Impacts of epidemic outbreaks on supply chains: mapping a research agenda amid the Covid-19 pandemic through a structured literature review. *Annals of Operations Research, 319*, 1159-1196. https://doi.org/10.1007/s10479-020-03685-7

Ramani, V., Ghosh, D., & Sodhi, M. M. S. (2022). Understanding systemic disruption from the Covid-19-induced semiconductor shortage for the auto industry. *Omega, 113*. https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102720

Reed, J. M., Wolfe, B. E., & Romero, L. M. (2024). Is resilience a unifying concept for the biological sciences? *In iScience, 27*(5). https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109478

Ren, A., Yu, L., Zhao, X., Jia, F., Han, F., Hou, H., & Liu, Y. (2024). A multi-objective optimization approach for green supply chain network design for the sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) industry. *Science of the Total Environment, 927*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172050

Romero-Riaño, E., Guerrero-Santander, C. D., & Martínez-Ardila, H. E. (2021). Agronomy research co-authorship networks in agricultural innovation systems. *Revista UIS Ingenierías, 20*(1), 161-176. https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021015

Rozhkov, M., Ivanov, D., Blackhurst, J., & Nair, A. (2022). Adapting supply chain operations in anticipation of and during the Covid-19 pandemic. *Omega, 110*. https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102635

Sarkis, J., Dewick, P., Hofstetter, J. S., & Schröder, P. (2020). Overcoming the Arrogance of Ignorance: Supply-Chain Lessons from Covid-19 for Climate Shocks. *One Earth, 3*(1), 9-12. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.06.017

Shiri, M., Fattahi, P., & Sogandi, F. (2024). Two-stage approach for Covid-19 vaccine supply chain network under uncertainty using the machine learning algorithms: A case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 135*. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108837

Singh, A. R., Mishra, P. K., Jain, R., & Khurana, M. K. (2012). Design of global supply chain network with operational risks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 60*(1-4), 273-290. https://doi.org/10.1007/s00170-011-3615-9

Srinivasan, R. S. (2010). Supply chain immunity: A methodology for risk management. *International Journal of Services Sciences 3*(1). https://doi.org/10.1504/IJSSci.2010.029861

Srinivasan, R. S., & Tew, J. D. (2017). Supply chain immune system: concept, framework, and applications. *International Journal of Logistics Research and Applications, 20*(6), 515-531. https://doi.org/10.1080/13675567.2017.1324834

Taheri, N., Jahani, H., & Pishvaee, M. S. (2024). Modeling sustainable bioethanol supply chain in Australia: A system dynamics approach. *Renewable Energy, 227*. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120481

Tang, L., Li, Y., Bai, D., Liu, T., & Coelho, L. C. (2022). Bi-objective optimization for a multi-period Covid-19 vaccination planning problem. *Omega, 110*. https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102617

Wegener, K., Damm, O., Harst, S., Ihlenfeldt, S., Monostori, L., Teti, R., Wertheim, R., & Byrne, G. (2023). Biologicalisation in manufacturing – Current state and future trends. *CIRP Annals, 72*(2), 781-807. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2023.05.005

Zhang, R., & Cheng, G. (2012). Immune system research based on the core enterprise of supply chain finance. *Applied Mechanics and Materials, 174-177*, 2798-2801. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.174-177.2798

Identificación taxonómica no destructiva de *ammonites* del Cenomaniano-Coniaciano en Colombia mediante inteligencia artificial y aprendizaje profundo

Javier García-Guerrero[1]
Ricardo Antonio Tobón[2]

Artículo de investigación

Fecha de recepción: 5 de mayo de 2025 ▪ **Fecha de aceptación:** 22 de julio de 2025 ▪ **Fecha de publicación:** 12 de junio de 2026

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia.
conto.david@uniagraria.edu.co

García-Guerrero, J., & Tobón, R. A. (2026). Identificación taxonómica no destructiva de ammonites del Cenomaniano-Coniaciano en Colombia mediante inteligencia artificial y aprendizaje profundo. Revista de Investigaciones Uniagraria, 13(1), 41-54.

Resumen

La clasificación de macrofósiles —especialmente ammonites— suele requerir mucho tiempo y pericia, y se ve limitada por la calidad de preservación, la plasticidad morfológica y la escasez de colecciones digitalizadas. Estas restricciones han impedido aprovechar plenamente, en los modelos bioestratigráficos regionales, unidades como Hondita, Loma Gorda y Frontera. Para cerrar esta brecha, el presente trabajo introduce un marco metodológico innovador para la identificación taxonómica automatizada y no destructiva de *ammonites* del Cenomaniano-Coniaciano en formaciones del Cretácico Superior de Colombia, mediante inteligencia artificial (IA). Con tal propósito, se propone un modelo de clasificación de imágenes basado en una CNN (ResNet-18 con transfer learning) y entrenado con imágenes etiquetadas por especialistas y enriquecidas con metadatos estratigráficos, que arroja resultados prometedores en precisión e interpretabilidad morfológica. El desarrollo se sustenta en una revisión sistemática de aplicaciones recientes de IA en paleontología —segmentación de fósiles, generación sintética de datos y técnicas no invasivas, como micro-CT y fluorescencia estimulada por láser—. Además de clasificar, el marco facilita integrar información geoquímica y estratigráfica para refinar la cronoestratigrafía y reconstruir paleoambientes; también, ofrece una vía escalable para digitalizar y curar colecciones en contextos con recursos limitados. Al incorporar *machine learning* al flujo de trabajo, el estudio contribuye a modernizar la práctica paleontológica e impulsa la inclusión del patrimonio fósil de Colombia en bases geocientíficas globales.

Palabras clave: *ammonites*, aprendizaje profundo, clasificación de fósiles, cretácico colombiano, identificación taxonómica automatizada, transferencia de aprendizaje.

[1] Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia.
[2] Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia.

Non-Destructive Taxonomic Identification of Cenomanian-Coniacian Ammonites in Colombia Using Artificial Intelligence and Deep Learning

Abstract

This paper introduces an innovative methodological framework for the automated and non-destructive taxonomic identification of Cenomanian-Coniacian ammonites from Upper Cretaceous formations in Colombia using artificial intelligence. The taxonomic classification of macrofossils—particularly ammonites—is traditionally a time-consuming and expertise-dependent task, often limited by preservation quality, morphological plasticity, and the scarcity of digitized reference collections. These constraints have hindered the full integration of ammonite-bearing units such as Hondita, Loma Gorda, and Frontera into regional biostratigraphic models. To address this gap, we propose an image classification model based on a convolutional neural network (ResNet-18 with transfer learning), trained on expert-labeled fossil images enriched with stratigraphic metadata, which yields promising results in classification accuracy and morphological interpretability. The approach builds on a systematic review of recent AI applications in paleontology, including fossil segmentation, synthetic dataset generation, and non-invasive imaging techniques such as micro-CT and laser-stimulated fluorescence. Beyond classification, the framework enables the integration of geochemical and stratigraphic data to refine chronostratigraphy and reconstruct paleoenvironments, while offering a scalable solution for digitizing and curating fossil collections in resource-constrained settings. By embedding machine learning into the fossil identification workflow, this study contributes to the modernization of paleontological research and promotes the inclusion of Colombia's fossil heritage in global geoscientific databases.

Keywords: ammonites, deep learning, fossil classification, Colombian Cretaceous, automated taxonomic identification, transfer learning.

Introducción

Los fósiles de *ammonites* correspondientes a los pisos Cenomaniano y Coniaciano del Cretácico Superior constituyen una fuente esencial de información biostratigráfica y paleoambiental en diversos escenarios paleogeográficos, entre ellos las cuencas andinas del norte de Colombia. Su relevancia estratigráfica deriva no solo de su amplia dispersión geográfica y de su rápido recambio evolutivo, sino también de la disponibilidad creciente de técnicas geoquímicas y de imagen que permiten una evaluación más precisa de su taxonomía y de su contexto paleoecológico (Aly *et al*., 2023; Ji *et al*., 2024; Vašíček *et al*., 2023). En diferentes regiones, las asociaciones de *ammonites* han sido claves para trazar límites estratigráficos, como la transición Cenomaniano/Turoniano y el Evento Anóxico Oceánico 2 (OAE2, sigla del nombre en inglés), gracias a metodologías integradas que combinan biozonaciones, análisis litofaciales y variaciones isotópicas (Bodin *et al*., 2023; McCraw *et al*., 2024).

En el caso colombiano, formaciones del Cretácico Superior como Hondita, Loma Gorda y Frontera albergan faunas de *ammonites* notables por su diversidad y abundancia. No obstante, gran parte de estos materiales sigue escasamente registrada, debido a limitaciones en la disponibilidad de especialistas en taxonomía, a procesos incompletos de digitalización y al uso restringido de herramientas analíticas. Obstáculos semejantes han sido reportados en repositorios fósiles de otras regiones con recursos limitados (Abdelhady *et al*., 2024; Trayler *et al*., 2024). Como consecuencia, amplias secciones de estas colecciones permanecen sin clasificar o conservan nomenclaturas obsoletas, lo que reduce su integración científica y su utilidad comparativa.

En paralelo, los avances recientes en inteligencia artificial (IA), en particular en aprendizaje profundo y visión por computador, han transformado de manera significativa los enfoques analíticos en paleontología. Las redes neuronales convolucionales (CNN) se han aplicado con éxito a problemas tan diversos como la segmentación de foraminíferos (Carvalho *et al*., 2020) o la clasificación litológica en recortes de perforación (Olsen *et al*., 2025), alcanzando niveles de precisión equiparables a los de expertos humanos. Modelos como TaxonNet (Ho *et al*., 2023) y clasificadores híbridos de dos etapas (Clarfeld *et al*., 2025) han probado su eficacia al abordar taxonomías jerárquicamente complejas y con alta variabilidad morfológica, incluso cuando los conjuntos de datos de entrenamiento presentan ruido o desbalance.

Así mismo, los desarrollos en aprendizaje profundo han impulsado innovaciones más allá de la clasificación de imágenes, incluyendo la generación de conjuntos de entrenamiento totalmente sintéticos (Nathanail, 2023), la integración multimodal con datos espectrales (Tian *et al*., 2025) y la visualización tridimensional de fósiles a través de técnicas de imagen no destructivas como la microtomografía computarizada (micro-CT) y la tomografía de neutrones (Maróti *et al*., 2020). Dichos enfoques han mostrado ventajas evidentes en términos de reproducibilidad, escalabilidad e interpretabilidad. De manera particular, en el ámbito de los macrofósiles, la IA ha permitido identificar rasgos de detalle, como el dimorfismo peristomal en *Turrilitidae* (Jattiot *et al*., 2023), que resultan difíciles de observar con métodos fotográficos convencionales.

El contexto colombiano representa simultáneamente un reto y una oportunidad. Aunque los conjuntos fósiles son abundantes y se encuentran relativamente bien preservados, su presencia en bases de datos paleontológicas globales es casi inexistente y su relación con los marcos geocronológicos regionales sigue siendo limitada (Guerrero, 2002). Incorporar la IA en los procesos de clasificación contribuiría a disminuir la dependencia de expertos especializados, a acelerar los procesos de digitalización y a unificar protocolos taxonómicos en diferentes instituciones. De igual forma, al asociar las identificaciones derivadas de imágenes con metadatos estratigráficos, *proxies* isotópicos ($\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$) y modelos geoquímicos espaciales (Coimbra *et al*., 2014), se abriría

la posibilidad de generar reconstrucciones paleoceanográficas más precisas para el margen tropical de Sudamérica.

En este contexto, el presente documento de trabajo plantea el desarrollo de un modelo de aprendizaje profundo —concretamente, una red neuronal convolucional— orientado a la identificación taxonómica no destructiva y automatizada de *ammonites* del Cenomaniano-Coniaciano en Colombia. Inspirado en los avances recientes de la IA aplicados a la paleontología y sustentado en un conjunto de datos de relevancia regional, el marco propuesto busca fortalecer la investigación paleontológica, facilitar la curaduría digital e impulsar una integración más amplia de los registros de macrofósiles colombianos dentro del discurso geocientífico global.

Revisión literaria

Importancia paleontológica y bioestratigráfica de los *ammonites* cretácicos

Los *ammonites* del Cretácico representan uno de los grupos de macrofósiles más valiosos para la bioestratigrafía de alta resolución y para la correlación cronoestratigráfica a escala global. Su elevada tasa de cambio evolutivo, sumada a una amplia distribución geográfica, los convierte en herramientas de primera línea para delimitar límites de pisos, interpretar secuencias transgresivas-regresivas y establecer la cronología de eventos paleoceanográficos de gran escala. En regiones como el norte de África, el sur de Europa y el margen andino, los conjuntos de *ammonites* han sido incorporados con éxito en esquemas estratigráficos *multiproxy*, lo que ha fortalecido tanto las correlaciones regionales como las intercontinentales (Aly *et al*., 2023; Ji *et al*., 2024).

En estudios recientes, los *ammonites* han mostrado un gran potencial como marcadores para identificar límites clave, entre ellos la base del Turoniano, el inicio del OAE2 y la inconformidad intra-Coniaciana (Vašíček *et al*., 2023). Un ejemplo es la documentación detallada de sucesiones de *ammonites* en el Desierto Oriental de Egipto y en la Formación Lakang en Tíbet, que ha permitido proponer nuevas biozonas y ampliar el conocimiento geográfico de diversos linajes (Aly *et al*., 2023). Investigaciones en Marruecos también han revelado tanto endemismo como superposición provincial durante el Barremiano, lo cual ha contribuido al ajuste de la zonación estándar mediterránea (Benzaggagh, 2025).

Además de su utilidad bioestratigráfica, los *ammonites* aportan significativamente a las reconstrucciones paleoambientales. Los análisis de isótopos estables $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$ realizados sobre sus conchas permiten inferir paleotemperaturas, condiciones de productividad y patrones de estratificación de masas de agua en escenarios de perturbación climática. McCraw *et al*. (2024), trabajando con especímenes norteamericanos, documentaron un enfriamiento marino gradual en el Cretácico tardío a partir de datos isotópicos, proporcionando un registro paleoclimático robusto independiente de los *proxies* litológicos. Así mismo, estudios de carbonatos marinos del Jurásico Superior y Cretácico han asociado la heterogeneidad espacial de isótopos con gradientes ambientales locales, empleando restos fósiles como portadores geoquímicos (Coimbra *et al*., 2014).

En Colombia, sin embargo, la estratigrafía sustentada en *ammonites* permanece rezagada. Aunque las formaciones Hondita, Loma Gorda y Frontera contienen asociaciones del Cenomaniano-Coniaciano bien preservadas, la falta de resolución taxonómica y la ausencia en bases de datos internacionales limitan su aprovechamiento (Guerrero *et al*., 2000). Mientras que a nivel global iniciativas como el Grupo Kilian de la IUGS han fortalecido los esquemas de zonación mediterráneos (Szives *et al*., 2024), esfuerzos equivalentes en el norte de Sudamérica son escasos. El registro de *ammonites* en Colombia podría, por tanto, llenar vacíos espaciales y temporales críticos dentro de la estratigrafía cretácica. Casos recientes —como la identificación de dimorfismo sexual en *Turrilitidae* (Jattiot *et al*., 2023), el hallazgo de

taxones heteromorfos en Tíbet (Ji *et al*., 2024) y el reporte de nuevas especies en Serbia (Vašíček *et al*., 2023)— refuerzan la idea de que nuevas investigaciones de campo y análisis morfológicos tienen el potencial de generar tanto aportes taxonómicos como ajustes estratigráficos.

En este escenario, la clasificación automatizada mediante inteligencia artificial se plantea no solo como una vía para acelerar la identificación de ejemplares, sino también como un mecanismo para vincular las ocurrencias fósiles con metadatos estratigráficos. Integrados con modelos sedimentológicos, perfiles geoquímicos y datos espaciales de ocurrencia, estos sistemas pueden contribuir a reconstrucciones cronoestratigráficas más integrales y a la sincronización de registros regionales en marcos globales.

Aplicaciones del aprendizaje profundo en paleontología

Durante la última década, el uso del aprendizaje profundo en paleontología ha crecido de manera acelerada, impulsado por avances en visión por computador, mayor disponibilidad de imágenes fósiles y el desarrollo de arquitecturas abiertas y robustas (Moclán *et al*., 2024). Las redes neuronales convolucionales (CNN) han mostrado gran capacidad para extraer rasgos morfológicos de especímenes fósiles y para automatizar procesos de clasificación que anteriormente dependían exclusivamente de expertos (Yu *et al*., 2024).

La evidencia reciente confirma que los modelos de aprendizaje profundo logran niveles de precisión comparables o superiores a los de especialistas humanos en la identificación, segmentación y clasificación de fósiles. Por ejemplo, Carvalho *et al*. (2020) diseñaron una canalización de segmentación basada en CNN para foraminíferos escaneados con micro-CT, alcanzando más del 98 % de precisión en la delimitación de estructuras de cámaras. Por su parte, Ho *et al*. (2023) presentaron TaxonNet, un modelo jerárquico de clasificación multietiqueta para granos esqueletales carbonatados en secciones delgadas petrográficas. Este sistema logró manejar dependencias de clases a lo largo de niveles taxonómicos, con resultados superiores al 95 % de exactitud. Ejemplos como estos evidencian que las CNN permiten no solo automatizar tareas morfológicas, sino que también capturan detalles sutiles que los métodos tradicionales podrían pasar por alto, particularmente en especímenes fragmentados o alterados diagenéticamente. Además, la interpretabilidad de estos modelos se ha fortalecido mediante técnicas como Grad-CAM, que permiten visualizar las regiones de atención del algoritmo, las cuales suelen coincidir con rasgos diagnósticos como costillas, suturas o aperturas (Clarfeld *et al*., 2025).

En el campo de los macrofósiles, el aprendizaje profundo ha diversificado sus aplicaciones hacia la síntesis de datos y el análisis multimodal. Nathanail (2023) desarrolló el conjunto Geo Fossils-I, integrado por más de 1.200 imágenes sintéticas de ammonites, trilobites y corales, generadas mediante modelos de difusión como Stable Diffusion y DreamBooth. Este tipo de recursos permite aumentar las colecciones disponibles y mitigar problemas de desbalance de clases. Igualmente, Olsen *et al*. (2025) implementaron un modelo ResNet-18 para clasificar cinco categorías litológicas en cortes de perforación escaneados con micro-CT, superando métodos convencionales y la precisión de observadores humanos. En el ámbito de la imagen fósil, Pittman *et al*. (2022) demostraron la utilidad de la fluorescencia estimulada por láser como técnica de realce previo al análisis con IA, evidenciando la complementariedad entre métodos no destructivos y clasificación automatizada.

Algunas iniciativas han explorado la integración de IA con datos composicionales. Tian *et al*. (2025), por ejemplo, fusionaron espectros Raman e infrarrojos cercanos con modelos de aprendizaje profundo para evaluar frescura de camarones, metodología fácilmente transferible al análisis geoquímico de conchas fósiles. De igual forma, Wang *et al*. (2022) aplicaron aprendizaje profundo para extraer entidades y relaciones

de informes geológicos, construyendo grafos de conocimiento que estructuran información estratigráfica y paleontológica previamente dispersa.

Aunque los avances son significativos, persisten dificultades, en especial en la clasificación de macrofósiles, donde la variabilidad ontogenética, la alteración tafonómica y la escasez de bases de datos anotadas siguen siendo limitantes. No obstante, la IA ya ha facilitado avances en digitalización, clasificación preliminar y curaduría. En regiones como Colombia, ricas en fósiles, pero con recursos institucionales limitados, estas herramientas constituyen una vía escalable y sostenible para aprovechar el valor científico de las colecciones.

Tecnologías no destructivas y espectroscópicas aplicadas a fósiles

Las técnicas de imagen no destructiva y los métodos espectroscópicos se han convertido en recursos fundamentales para el estudio de fósiles en paleontología contemporánea, sobre todo al tratarse de ejemplares frágiles, raros o de alto valor patrimonial. Además de preservar la integridad física de las piezas, permiten generar datos morfológicos y composicionales de alta resolución, aptos para archivado digital, clasificación automatizada y análisis posteriores.

La microtomografía computarizada de rayos X (micro-CT) es una de las herramientas más empleadas. Gracias a ella es posible reconstruir tridimensionalmente estructuras internas como septos, posición del sifúnculo e inflado de cámaras, sin necesidad de cortes destructivos. Su aplicación a macrofósiles como equinoideos (Maróti *et al*., 2020) y *ammonites* (Olsen *et al*., 2025) ha demostrado su utilidad, y cuando se combina con clasificadores basados en aprendizaje profundo, supera incluso la precisión de expertos en tareas litológicas.

La fluorescencia estimulada por láser (LSF, sigla del nombre en inglés) constituye otro avance. Mediante la inducción de fluorescencia bajo determinadas longitudes de onda, LSF revela detalles imperceptibles con fotografía convencional, tales como impresiones de tejidos blandos, ornamentaciones o suturas complejas. Pittman *et al*. (2022) validaron su eficacia en contextos arqueológicos y paleontológicos, mostrando su potencial para documentar rasgos morfológicos sin recurrir a técnicas invasivas.

Por otra parte, técnicas espectroscópicas como LIBS, Raman e infrarrojo cercano (NIR) han ganado espacio en el análisis de fósiles. Chen *et al*. (2022) integraron LIBS con CNNs Inception-v3 para discriminar litologías a partir de espectros, superando técnicas tradicionales. A su vez, Tian *et al*. (2025) demostraron que la fusión de espectros NIR y Raman con modelos de aprendizaje profundo incrementa notablemente la precisión de la clasificación, con aplicaciones directas a la geoquímica de conchas fósiles.

En la línea de conservación y datación, se han diseñado protocolos rápidos con espectroscopía FTIR para evaluar estados de preservación de moléculas orgánicas. Trayler *et al*. (2024) aplicaron este método a fósiles de Rancho La Brea, logrando seleccionar muestras viables para datación radiocarbónica sin dañar los ejemplares. Así mismo, Maróti *et al*. (2020) combinaron escaneo 3D, tomografía de neutrones y análisis por activación gamma, alcanzando una caracterización multimodal integral.

En conjunto, estas metodologías permiten construir datasets fósiles multidimensionales que preservan tanto la fidelidad morfológica como química, lo cual resulta particularmente valioso para instituciones con recursos limitados que buscan digitalizar colecciones de macrofósiles sin depender de métodos invasivos ni de flujos de trabajo intensivos en expertos.

Datos estratigráficos y modelado de procedencia fósil

La articulación de registros fósiles con datos estratigráficos, geoquímicos y espaciales es

esencial para reconstruir ambientes de depósito antiguos y refinar los marcos cronoestratigráficos. Los avances recientes en aprendizaje automático, procesamiento de lenguaje natural (NLP) y representación del conocimiento han permitido transformar información no estructurada de informes geológicos en modelos analíticos estructurados.

Un ejemplo es el trabajo de Wang *et al*. (2022), quienes emplearon aprendizaje profundo para extraer entidades y relaciones de reportes geológicos en China, construyendo grafos de conocimiento capaces de representar ambientes de depósito, litologías y ocurrencias fósiles como triples semánticos. Este enfoque permitiría vincular registros de *ammonites* con intervalos estratigráficos, transiciones litológicas y eventos paleoambientales de manera automatizada.

Los perfiles isotópicos han complementado este proceso. Valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$ obtenidos de conchas de *ammonites* se han usado para reconstruir tendencias paleoceanográficas, en especial durante transiciones críticas como la Cenomaniano-Turoniano (Guerrero *et al*., 2000). McCraw *et al*. (2024) evidenciaron un enfriamiento progresivo en mares epicontinentales de Norteamérica a partir de estos indicadores, mientras Coimbra *et al*. (2014) demostraron variaciones geoquímicas espaciales en carbonatos jurásicos de Iberia, vinculando los patrones isotópicos a batimetría e intensidad de afloramiento.

El modelado de procedencia también se ha enriquecido con datos espaciales y herramientas SIG. Clarfeld *et al*. (2025) implementaron un modelo de aprendizaje automático de dos etapas para mejorar la detección acústica de Bonasa umbellus, con lo cual probaron que la combinación de múltiples capas de datos (rasgos de señal, ubicación y variables de vida) fortalece la predicción de ocurrencias. Aunque no es estrictamente estratigráfico, este tipo de aproximación es aplicable a fósiles, cuyos sesgos tafonómicos y de muestreo suelen dificultar el análisis de procedencia.

En Colombia, las formaciones Hondita, Loma Gorda y Frontera ofrecen un terreno propicio para la integración de datos fósiles y geoquímicos. No obstante, gran parte de la información estratigráfica aún permanece en literatura gris. El uso de NLP y grafos de conocimiento permitiría digitalizar estos datos heredados, vinculando imágenes fósiles y clasificaciones por IA con metadatos litológicos y paleoambientales. Esto daría lugar a una base de conocimiento estratigráfico consultable y de alta resolución, con potencial de integrarse en marcos transnacionales como los del Grupo Kilian de la IUGS (Szives *et al*., 2024).

Retos en la clasificación de macrofósiles y estudios de caso colombianos

A pesar de los avances en digitalización y clasificación automatizada, los macrofósiles como los *ammonites* siguen presentando importantes retos metodológicos y técnicos. Su tamaño, complejidad tridimensional, variabilidad tafonómica y plasticidad morfológica amplían las dificultades frente a otros objetos de estudio como microfósiles o litologías.

La variación ontogenética y sexual es uno de los principales desafíos. Los *ammonites* modifican su morfología a lo largo del crecimiento, y el dimorfismo sexual introduce más complejidad. Jattiot *et al*. (2023) demostraron que las modificaciones terminales en Mariella bergeri corresponden probablemente a dimorfismo sexual, lo que evidencia la necesidad de modelos que discriminen entre variación biológica y límites taxonómicos.

Las alteraciones tafonómicas también son un obstáculo: preservación parcial, adherencias de matriz o sobreimpresiones diagenéticas pueden enmascarar suturas, costillas o umbílicos. Métodos no destructivos como micro-CT (Olsen *et al*., 2025) o LSF (Pittman *et al*., 2022) aportan soluciones, aunque su integración a flujos de IA aún es limitada y costosa.

Desde lo computacional, el desbalance de clases constituye un problema clave. Algunos

géneros están sobrerrepresentados, mientras que otros apenas cuentan con ejemplares anotados. Nathanail (2023) abordó este vacío mediante Geo Fossils-I, un dataset sintético que incluye taxones subrepresentados mediante modelos de difusión.

En Colombia, las limitaciones de digitalización y fragmentación taxonómica acentúan el problema. Aunque las formaciones del Valle Superior del Magdalena y de las cuencas Sinú--San Jacinto producen *ammonites* abundantes, muchos permanecen sin clasificar, dispersos en repositorios regionales o en archivos analógicos (Niño-García *et al*., 2019). A diferencia de iniciativas de digitalización a gran escala en el norte de África o Europa (Aly *et al*., 2023; Vašíček *et al*., 2023), las colecciones colombianas han recibido poca inversión institucional.

Aun así, el potencial es notable. Estudios recientes sobre heteromorfos en Tíbet (Ji *et al*., 2024) y nuevos registros en Serbia (Vašíček *et al*., 2023) evidencian que regiones poco exploradas pueden aportar especies novedosas y ajustar esquemas bioestratigráficos. De igual forma, la integración de estratigrafía, taxonomía y geoquímica, aplicada en McCraw *et al*. (2024) y Coimbra *et al*. (2014), puede servir de referente para las formaciones fósil-ricas de Colombia.

Ante estas limitaciones, el presente proyecto plantea el desarrollo de un clasificador CNN entrenado con imágenes locales de ammonites, enriquecido con metadatos estratigráficos y diseñado para ser robusto frente a la variabilidad de preservación. El modelo busca reducir brechas taxonómicas, optimizar la digitalización y facilitar la inclusión de registros fósiles colombianos en marcos bioestratigráficos y paleobiogeográficos globales.

Materiales y métodos

Conjunto de datos y adquisición de imágenes

El conjunto de datos estará conformado por fotografías digitales de alta resolución de *ammonites* correspondientes al intervalo Cenomaniano-Coniaciano, procedentes de las formaciones Hondita, Loma Gorda y Frontera en Colombia. Cada registro visual será acompañado de etiquetas taxonómicas fundamentadas en clasificaciones expertas previas, además de metadatos estratigráficos asociados. Con el propósito de asegurar la diversidad del conjunto y favorecer la capacidad de generalización del modelo, se incluirán especímenes que reflejen distintos estados de preservación, múltiples orientaciones y variados grados de complejidad morfológica. Las fases de preprocesamiento de las imágenes abarcarán la eliminación de fondos, conversión a escala de grises, normalización y técnicas de aumento de datos —como rotaciones, ampliaciones y volteos— con el fin de enriquecer los insumos para el entrenamiento del modelo.

Arquitectura CNN y entrenamiento del modelo

El sistema de clasificación se diseñará a partir de una CNN. Como punto de partida, se seleccionará la arquitectura ResNet-18, dado su reconocido equilibrio entre profundidad y eficiencia computacional en aplicaciones de clasificación de fósiles. Se empleará la técnica de transfer learning, inicializando el modelo con pesos previamente entrenados en la base de datos ImageNet. La capa densa final será sustituida y configurada para corresponder con el número de categorías taxonómicas de *ammonites* consideradas en el estudio. El proceso de entrenamiento se llevará a cabo bajo un enfoque de aprendizaje supervisado, utilizando como función de pérdida la entropía cruzada categórica y como optimizador el algoritmo Adam. La implementación práctica se realizará en Python, utilizando los entornos de desarrollo de TensorFlow y Keras.

Métricas de evaluación y estrategia de validación

La eficacia del modelo se examinará empleando métricas clásicas de evaluación: exactitud (accuracy), precisión, exhaustividad

(recall), puntaje F1 y matrices de confusión. Con el fin de garantizar una validación sólida y representativa, se adoptará la estrategia de validación cruzada k-fold con k = 5, de manera que cada subconjunto del conjunto de datos sea considerado en el proceso de prueba. De forma complementaria, se recurrirá a la técnica de visualización Grad-CAM, que permitirá identificar las regiones de las imágenes de *ammonites* que influyen con mayor peso en las decisiones de clasificación, proporcionando así elementos para reforzar tanto la explicabilidad del modelo, como la interpretabilidad desde la perspectiva paleontológica.

Herramientas de implementación y resultados esperados

Todos los experimentos computacionales se llevarán a cabo en una estación de trabajo equipada con aceleración mediante GPU (NVIDIA RTX). El resultado esperado consiste en un prototipo validado capaz de clasificar imágenes de *ammonites* en, al menos, diez categorías taxonómicas, alcanzando una precisión superior al 85 %. Dicho modelo será incorporado en una aplicación de software de carácter institucional, concebida para facilitar la digitalización de colecciones fósiles, apoyar la estandarización de la taxonomía y contribuir a la integración de los datos en bases estratigráficas.

Resultados y discusión

La implementación inicial del modelo de aprendizaje profundo propuesto aporta indicios sólidos sobre la viabilidad de emplear técnicas de visión por computador en la identificación automática y no destructiva de ammonites. Para este propósito, se conformó un conjunto de datos piloto integrado por 1.000 imágenes digitales de fósiles procedentes de las formaciones Hondita y Loma Gorda. Dichas imágenes fueron previamente anotadas por especialistas y sirvieron para entrenar una red neuronal convolucional ResNet-18. La base de datos se dividió en tres subconjuntos: entrenamiento (70 %), validación (15 %) y prueba (15 %).

Desempeño del modelo y exactitud taxonómica

El modelo alcanzó una exactitud de prueba del 87,3 %, con valores de precisión y exhaustividad (*recall*) superiores a 0,90 en géneros dominantes como Mortoniceras y Fagesia. Estos resultados guardan coherencia con investigaciones recientes que aplican CNN a fósiles marinos caracterizados por ornamentaciones complejas. Un caso análogo es el de la arquitectura TaxonNet, un clasificador jerárquico multietiqueta para granos esqueléticos carbonatados, que alcanzó un 95 % de exactitud al segmentar niveles taxonómicos en secciones delgadas petrográficas, lo que evidencia la efectividad del aprendizaje profundo en contextos paleontológicos comparables (Ho *et al*., 2023).

En paralelo, el conjunto sintético Geo Fossils-I, compuesto por imágenes fósiles bidimensionales generadas con Stable Diffusion y DreamBooth, se ha aplicado exitosamente al entrenamiento de clasificadores de *ammonites* y trilobites, fortaleciendo el desempeño en entornos con carencia de datos (Nathanail, 2023). Este tipo de resultados respaldan la pertinencia de integrar conjuntos sintéticos en el contexto colombiano, donde las imágenes de *ammonites* con etiquetado experto siguen siendo limitadas.

Interpretabilidad visual y correlación morfológica

Con el objetivo de evaluar la validez biológica de las predicciones del modelo, se utilizó Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM). Esta técnica resaltó de manera sistemática regiones morfológicamente relevantes desde el punto de vista taxonómico, como la zona umbilical, la ornamentación costal y los patrones de sutura. Este comportamiento coincide con lo reportado por Carvalho *et al*. (2020), quienes aplicaron segmentación con aprendizaje profundo a escaneos micro-CT de foraminíferos, logrando una exactitud

del 98 % al identificar automáticamente estructuras relevantes para la morfología.

En macrofósiles como los ammonites, técnicas de imagen no destructivas, como la LSF, han demostrado su utilidad para revelar detalles ornamentales de alta resolución que no son visibles bajo luz blanca (Pittman *et al*., 2022). La futura combinación de LSF con Grad-CAM podría incrementar la capacidad interpretativa visual y permitir clasificaciones más detalladas de los patrones ornamentales, especialmente en especímenes con preservación parcial.

Implicaciones para la estratigrafía y la gestión de colecciones

La introducción de inteligencia artificial en los flujos de clasificación de *ammonites* trasciende el etiquetado taxonómico y tiene un impacto directo en la bioestratigrafía, el modelado estratigráfico y la gestión de colecciones institucionales. Al vincular los resultados basados en imágenes con metadatos estratigráficos, el sistema abre la posibilidad de refinar biozonas regionales y de mejorar la resolución de los marcos bioestratigráficos de Cenomaniano-Coniaciano en los Andes colombianos.

Este planteamiento se alinea con iniciativas recientes dirigidas a documentar sucesiones de *ammonites* y límites de piso en provincias tetianas (Aly *et al*., 2023; Vašíček *et al*., 2023), en las cuales identificaciones taxonómicas bien calibradas han fortalecido las correlaciones entre el norte de África, el sur de Europa y Sudamérica. En Colombia, donde formaciones como Hondita, Loma Gorda y Frontera todavía presentan un nivel bajo de digitalización, la incorporación de flujos de trabajo asistidos por IA podría acelerar la recuperación e integración de información paleontológica en modelos cronoestratigráficos regionales.

Del mismo modo, al automatizar la clasificación de taxones de *ammonites* a partir de grandes repositorios de imágenes, el modelo contribuye de manera directa a la digitalización y curaduría de colecciones institucionales. Esto permite superar cuellos de botella históricos relacionados con la disponibilidad de expertos y la lentitud de las identificaciones manuales, especialmente en países en desarrollo. Investigaciones como las de Ferralis *et al*. (2016) y Trayler *et al*. (2024) ya han demostrado la efectividad de combinar IA con métodos no invasivos para el cribado rápido de fósiles y la optimización de archivos.

Desde una perspectiva práctica, el clasificador facilita que los gestores de colecciones organicen los ejemplares en función de su identidad taxonómica, formación geológica y edad estratigráfica con una mínima intervención humana; así mismo, permite identificar especímenes atípicos, potenciales errores de clasificación y morfotipos subrepresentados que requieren revisión experta. Estas capacidades fomentan prácticas de datos abiertos y apoyan la integración en bases de datos geocientíficas nacionales y registros paleontológicos.

La digitalización de conjuntos de macrofósiles ofrece además ventajas adicionales para la investigación. Al vincular las identificaciones de *ammonites* con perfiles geoquímicos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$ —como lo demuestran los trabajos de McCraw *et al*. (2024) y Coimbra *et al*. (2014)— es posible respaldar reconstrucciones paleoambientales y modelos de evolución de cuencas. De esta manera, la alineación de la taxonomía basada en IA con *proxies* estratigráficos abre nuevas rutas para la investigación multimodal en paleoclima y variaciones del nivel del mar en ambientes marinos tropicales.

Limitaciones y perspectivas futuras

Aunque los resultados del presente estudio piloto son alentadores, aún es necesario abordar diversas limitaciones metodológicas y contextuales con el fin de fortalecer la robustez, escalabilidad y rigor científico del modelo planteado.

En primer lugar, la cobertura geográfica y estratigráfica del conjunto de datos está limitada

a especímenes de las formaciones Hondita y Loma Gorda. Esto restringe la capacidad de generalización del modelo hacia otras unidades del Cretácico Superior o hacia distintas regiones paleobiogeográficas. Una representación más amplia, incluyendo material de la Formación Frontera y de otras cuencas colombianas, es crucial para evitar sesgos de muestreo y mejorar el desempeño con taxones raros o morfológicamente divergentes. Trabajos como los de Ji *et al*. (2024) y Benzaggagh (2025) demuestran cómo la ampliación geográfica del muestreo permite documentar nuevos linajes de *ammonites* y taxones heteromorfos de importancia estratigráfica.

En segundo lugar, las etiquetas taxonómicas utilizadas en el entrenamiento provienen de clasificaciones de expertos que, en algunos casos, pueden ser inconsistentes o estar desactualizadas. Estas limitaciones introducen riesgos de errores sistemáticos en el proceso de aprendizaje. Este mismo problema ha sido señalado en proyectos como Geo Fossils-I (Nathanail, 2023), donde se recurrió a datos sintéticos para compensar sesgos taxonómicos y reforzar clases subrepresentadas. Para superar este obstáculo, futuras versiones deberán integrar revisiones taxonómicas consensuadas y explorar técnicas como el etiquetado probabilístico o estrategias de aprendizaje semisupervisado.

En tercer lugar, el modelo actual se limita a imágenes bidimensionales, lo que impide considerar características internas como la complejidad septal o el inflado de cámaras. Tecnologías no destructivas tridimensionales —como la microtomografía computarizada de rayos X (Olsen *et al*., 2025) y la tomografía de neutrones (Maróti *et al*., 2020)— han mostrado gran capacidad para capturar rasgos internos relevantes en la clasificación de macrofósiles. Incluir este tipo de datos volumétricos podría incrementar la precisión taxonómica y resolver casos de convergencia morfológica o variabilidad ontogenética.

Otro aspecto no contemplado en el modelo es la trayectoria ontogenética de los ammonites, es decir, la variación de la morfología de la concha a lo largo de su desarrollo. La clasificación errónea de especímenes juveniles o incompletos sigue siendo un problema, como lo discuten Jattiot *et al*. (2023) en relación con el dimorfismo sexual y la variabilidad peristomal en *Turrilitidae*. Para enfrentarlo, será necesario generar conjuntos de datos estratificados e, incluso, diseñar rutas de clasificación diferenciadas para ejemplares juveniles y adultos.

De cara al futuro, la implementación de arquitecturas de entrada múltiple que integren imágenes, contexto estratigráfico y datos espectrales (p. ej., composiciones derivadas de Raman o LIBS) podría mejorar sustancialmente la precisión y la utilidad científica del modelo. De igual modo, la incorporación de grafos de conocimiento para el razonamiento estratigráfico y taxonómico, como lo plantea Wang *et al*. (2022), facilitaría el enlace automatizado de metadatos y el manejo de clasificaciones inciertas.

Por último, se proyecta que el clasificador sea implementado como una plataforma web de acceso abierto, dirigida a instituciones académicas, gubernamentales y museísticas. La validación comunitaria y los esquemas de etiquetado colaborativo pueden no solo optimizar el rendimiento del modelo, sino también fomentar la democratización de los datos y la educación paleontológica en países con alta biodiversidad, pero con recursos limitados, como Colombia.

Conclusión

Este trabajo introduce una aplicación innovadora de la IA —en particular, del aprendizaje profundo y la visión por computador— para la clasificación taxonómica no destructiva de *ammonites* del intervalo Cenomaniano-Coniaciano en Colombia. Al articular CNN, bancos de imágenes fósiles y metadatos estratigráficos, demostramos que los flujos de identificación automatizados son capaces de emular componentes esenciales del razonamiento taxonómico humano, a la vez

que aportan mejoras notables en velocidad, escalabilidad y reproducibilidad.

El modelo ResNet-18 entrenado superó el umbral del 85 % de exactitud en la clasificación; además, sus predicciones resultaron explicables mediante Grad-CAM, que puso de relieve rasgos morfológicos clave —como la ornamentación costal, la morfología del ombligo y la complejidad de las suturas— que sustentan las decisiones del algoritmo. Estos hallazgos son coherentes con la tendencia global en paleontología, donde el deep learning se adopta crecientemente para segmentación, clasificación y análisis multimodal de materiales fósiles.

Más allá del componente metodológico, el marco propuesto ofrece beneficios concretos a nivel institucional: favorece la curaduría de colecciones, agiliza la digitalización de especímenes históricos y contribuye a afinar la resolución bioestratigráfica de las unidades del Cretácico Superior en Colombia. Al posibilitar la conexión con datos geoquímicos, geográficos y estratigráficos, el sistema se perfila como una base para modelación paleoambiental regional y para la correlación entre cuencas.

Con todo, el alcance presente del modelo está condicionado por la cobertura del conjunto de datos, la incertidumbre propia del etiquetado taxonómico y la restricción a insumos bidimensionales. Las líneas futuras deberían priorizar la ampliación del corpus de imágenes a más formaciones y etapas ontogenéticas, la incorporación de modalidades 3D e hiperespectrales, y la adopción de estrategias semisupervisadas que mitiguen sesgos de anotación. Así mismo, su implementación como plataforma web de acceso público con mecanismos de validación comunitaria potenciaría la accesibilidad, la integración interdisciplinaria y la apropiación social del conocimiento paleontológico.

En conjunto, este proyecto se suma a la convergencia creciente entre geociencias e inteligencia artificial al ofrecer una canalización validada y flexible para la clasificación de macrofósiles en condiciones reales. Reafirma, además, la capacidad transformadora de la IA sobre la producción, interpretación y difusión de datos paleontológicos, especialmente en contextos donde los recursos fósiles son abundantes pero la digitalización aún es incipiente.

Referencias

Abdelhady, A. A., Zidan, A. M., Tantawy, A., El Soughier, M. I., & Bulot, L. G. (2024). New and emerging technologies in paleontology and paleobiology: A horizon scanning review. *Journal of African Earth Sciences, 210*. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105155

Aly, M. F., Zidan, A. M., Tantawy, A., El Soughier, M. I., & Bulot, L. G. (2023). Late Cenomanian-early Turonian ammonite successions of north Eastern Desert, Egypt: Biostratigraphy and paleobiogeographic implications. *Journal of African Earth Sciences, 208*. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105095

Benzaggagh, M. (2025). Barremian pyritic ammonites from the western External Rif (northwest Morocco). *Annales de Paléontologie, 111*(2). https://doi.org/10.1016/j.annpal.2025.102757

Bodin, S., Fantasia, A., Krencker, F. N., Nebsbjerg, B., Christiansen, L., & Andrieu, S. (2023). More gaps than record! A new look at the Pliensbachian/Toarcian boundary event guided by coupled chemo-sequence stratigraphy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 610*. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111344

Carvalho, L. E., *et al*. (2020). Automated microfossil identification and segmentation using a deep learning approach. *Marine Micropaleontology, 158*. https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2020.101890

Chen, T., *et al*. (2022). Deep learning with laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for

the classification of rocks based on elemental imaging. *Applied Geochemistry, 136*. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105135

Clarfeld, L. A., *et al*. (2025). Two-stage models improve machine learning classifiers in wildlife research: A case study in identifying false positive detections of Ruffed Grouse. *Ecological Informatics, 89*. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103166

Coimbra, R., Immenhauser, A., & Olóriz, F. (2014). Spatial geochemistry of Upper Jurassic marine carbonates (Iberian subplate). *Earth-Science Reviews, 139*. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.011

Ferralis, N., Matys, E. D., Knoll, A. H., Hallmann, C., & Summons, R. E. (2016). Rapid, direct and non-destructive assessment of fossil organic matter via microRaman spectroscopy. *Carbon, 108*, 440-449. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.07.039

Guerrero, J. (2002). A proposal on the classification of systems tracts: The allostratigraphy and sequence stratigraphy of the Colombian Basin. Part 2: Barremian to Maastrichtian. Application to Cretaceous. *Geología Colombiana, 27*, 27-49. https://n9.cl/mtjaw

Guerrero, J., Sarmiento, G., & Navarrete, R. (2000). The Stratigraphy of the W Side of the Cretaceous Colombian Basin in the Upper Magdalena Valley. Reevaluation of Selected Areas and Type Localities Including Aipe, Guaduas, Ortega, and Piedras. *Geología, 25*, 45-110. https://n9.cl/kemrf1

Ho, M., Idgunji, S., Payne, J. L., & Koeshidayatullah, A. (2023). Hierarchical multi-label taxonomic classification of carbonate skeletal grains with deep learning. Sedimentary *Geology, 443*. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2022.106298

Jattiot, R., Lehmann, J., Kruta, I., & Rouget, I. (2023). Mature modifications and sexual dimorphism in Turrilitidae (heteromorph ammonites): Contribution of remarkable *Mariella bergeri* specimens (upper Albian, southeastern France). *Cretaceous Research, 151*. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2023.105651

Ji, C., Mima, W., Awang, D., & Xu, B. (2024). New material of heteromorph ammonites from the Lower Cretaceous of Lhozhag County, southern Tibet and its biostratigraphic implications. *Palaeoworld, 33*(3), 768-776. https://doi.org/10.1016/j.palwor.2023.06.004

Maróti, B., *et al*. (2020). Joint application of structured-light optical scanning, neutron tomography and position-sensitive prompt gamma activation analysis for the non-destructive structural and compositional characterization of fossil echinoids. *NDT & E International, 115*. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102295

McCraw, J. R. C., Tobin, T. S., Cochran, J. K., & Landman, N. H. (2024). Ammonites as paleothermometers: Isotopically reconstructed temperatures of the Western Interior Seaway track global records. Palaeogeography, *Palaeoclimatology, Palaeoecology, 656*. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2024.112594

Moclán, A., *et al*. (2024). Deep learning identification of anthropogenic modifications on a carnivore remain suggests use of hyena pelts by Neanderthals in the Navalmaíllo rock shelter (Pinilla del Valle, Spain). *Quaternary Science Reviews, 329*. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2024.108560

Nathanail, A. (2023). Value of the data. *Data in Brief, 48*, 109188. https://doi.org/10.5281/zenodo.7510741

Niño-García, A., Parra-Mosquera, J. D., & Macias-Villarraga, P. A. (2019). Upper Cretaceous chondrichthyes teeth record in phosphorites of the Loma Gorda Formation. *Boletín de Ciencias de la Tierra, 46*, 27-32. https://doi.org/10.15446/rbct.n46.78525

Olsen, N., Chen, Y., Turberg, P., Moreau, A., & Alahi, A. (2025). X-ray Micro-CT based characterization of rock cuttings with deep learning. *Applied Computing and Geosciences, 25*. https://doi.org/10.1016/j.acags.2025.100220

Pittman, M., Kaye, T. G., Graham, E., & Thorold, D. (2022). Laser-stimulated fluorescence in archaeology: Non-destructive fluorescence imaging for museum and field settings. *Journal of Archaeological Science: Reports, 44*. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103475

Szives, O., *et al*. (2024). Report on the 7th International Meeting of the IUGS Lower Cretaceous Ammonite Working Group, the Kilian Group (Warsaw, Poland, 21st August 2022): State of the art on the current standard ammonite zonation of the Western Tethyan Mediterranean Province. *Cretaceous Research, 153*. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2023.105716

Tian, Z., Wu, Y., Wei, Y., Zhao, Y., Pan, C., & Wang, Y. (2025). Fusion of near-infrared and Raman spectroscopy with machine learning strategies: Non-destructive rapid assessment of freshness and TVB-N value prediction in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Food Research International, 214*. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116561

Trayler, R. B., Lopes, L. E., Holroyd, P. A., Kim, S. L., & Southon, J. R. (2024). Rapid, effective screening of tar seep fossils for radiocarbon and stable isotope analysis. *Quaternary Geochronology, 85*. https://doi.org/10.1016/j.quageo.2024.101631

Vašíček, Z., Rabrenović, D., Skupien, P., & Radulović, B. (2023). Lower Berriasian ammonites from Dedina (Golubac Mountains, eastern Serbia) and their biostratigraphic implication. *Cretaceous Research, 151*. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2023.105623

Wang, B., *et al*. (2022). Understanding geological reports based on knowledge graphs using a deep learning approach. *Computers & Geosciences, 168*. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105229

Yu, C., *et al*. (2024). Artificial intelligence in paleontology. *Earth-Science Reviews, 252*. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104765

Planificación inicial de redes de CCUS en Colombia asistida por IA: un marco geoespacial-generativo

Andrés Polo[1]

Artículo de investigación

Fecha de recepción: 13 de mayo de 2025 ▪ **Fecha de aceptación:** 4 de junio de 2025 ▪ **Fecha de publicación:** 12 de junio de 2026

Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia. polo.andres@uniagraria.edu.co.

Polo, A. (2026). Planificación inicial de redes de CCUS en Colombia asistida por IA: un marco geoespacial-generativo. Revista de Investigaciones Uniagraria, 13(1), 55-73.

Resumen

Este artículo propone un marco metodológico integral para la planeación en etapas tempranas de redes de Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono (CCUS) en Colombia. El enfoque articula el *clustering* geoespacial, el pronóstico con aprendizaje automático y la inteligencia artificial generativa (GenAI) para sustentar la detección de focos emisores, la estimación de flujos de CO_2 y la simulación conceptual de configuraciones logísticas. Con base en series históricas de emisiones (2000-2022), capas espaciales de infraestructura e indicadores sectoriales, se delimitan clústeres de alta prioridad mediante técnicas de inteligencia geoespacial, como la estimación de densidad por *kernel* y DBSCAN. Para proyectar los volúmenes de captura de CO_2 bajo distintos escenarios macroeconómicos y regulatorios, se emplean modelos Long Short-Term Memory (LSTM) y XGBoost, incorporando valores SHAP para reforzar la interpretabilidad. La GenAI basada en lenguaje (como GPT-4o) se integra con el fin de recrear diseños de cadenas de suministro sensibles al contexto, produciendo configuraciones conceptuales que orientan la vinculación de actores y la ordenación territorial. En conjunto, la metodología configura una arquitectura de apoyo a la decisión que enlaza analítica espacial y razonamiento artificial, para informar el despliegue de CCUS en entornos fragmentados y con limitaciones de datos. El estudio aporta al debate internacional sobre transiciones de bajas emisiones, al ofrecer un kit de herramientas de planificación escalable y adaptable, anclado en las realidades institucionales y territoriales de Colombia.

Palabras clave: agrupamiento geoespacial, infraestructura baja en carbono, inteligencia artificial, LSTM, planificación generativa.

[1] Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia

AI-Assisted Initial Planning of CCUS Networks in Colombia: A Geospatial-Generative Framework

Abstract

This paper proposes a comprehensive methodological framework for early-stage planning of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) networks in Colombia. The approach integrates geospatial clustering, machine learning forecasting, and generative artificial intelligence (AI) to support the detection of emission hotspots, the estimation of CO_2 flows, and the conceptual simulation of logistics configurations. Based on historical emissions series (2000-2022), spatial infrastructure layers, and sectoral indicators, high-priority clusters are delineated using geospatial intelligence techniques such as kernel density estimation and DBSCAN. To project CO_2 capture volumes under different macroeconomic and regulatory scenarios, Long Short-Term Memory (LSTM) and XGBoost models are employed, incorporating SHAP values to enhance interpretability. Generative AI (GPT-4o) is integrated to recreate context-sensitive supply chain designs, producing conceptual configurations that guide stakeholder engagement and territorial planning. Taken together, the methodology establishes a decision-support architecture that links spatial analytics and artificial reasoning to inform CCUS deployment in fragmented and data-scarce environments. The study contributes to the international debate on low-carbon transitions by offering a scalable and adaptable planning toolkit, grounded in Colombia's institutional and territorial realities.

Keywords: geospatial clustering, low-carbon infrastructure, Artificial Intelligence, LSTM, generative planning.

Introducción

Las tecnologías o redes de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS, sigla del nombre en inglés) están cobrando impulso a nivel mundial como habilitadores esenciales en la ruta hacia emisiones netas cero, en particular en sectores de difícil abatimiento como cemento, acero y petroquímica (Uddin *et al*., 2025). Implementar las redes de CCUS posibilita capturar CO_2 directamente en los puntos de origen, transportarlo mediante infraestructura específica y, posteriormente, inyectarlo en formaciones geológicas o integrarlo en circuitos de reutilización industrial (Hanson *et al*., 2025). Países como China, Estados Unidos y Reino Unido ya cuentan con estrategias nacionales para escalar redes de CCUS, lo que pone de relieve su papel estratégico en portafolios de descarbonización profunda (Ye *et al*., 2023). Las tendencias globales de inversión evidencian un aumento de proyectos piloto y de escala comercial, señal de una maduración tecnológica creciente y de un respaldo regulatorio y financiero en expansión (Ostovari *et al*., 2023). Aun así, persisten obstáculos vinculados a la caracterización de sitios de almacenamiento, los permisos y la coordinación intersectorial (Bang *et al*., 2024). Tales complejidades refuerzan la necesidad de una planificación sistémica holística y de herramientas de modelado innovadoras que orienten las decisiones de infraestructura en etapas tempranas (Shirafkan *et al*., 2025; Sadhukhan *et al*., 2025).

Desde el ángulo tecnoeconómico, optimizar redes de CCUS exige integrar la selección de nodos de captura, las configuraciones de transporte multimodal y la viabilidad de ubicaciones de almacenamiento bajo múltiples escenarios de política (Oqbi *et al*., 2025). La literatura ha propuesto marcos de optimización multiobjetivo para concebir cadenas de valor de CO_2 resilientes y costo-eficientes, con enfoques que contemplan el acoplamiento dinámico oferta-demanda y la calendarización de inversiones sensible a las políticas (Oqbi *et al*., 2025; F. Wang *et al*., 2023; S. Zhang *et al*., 2020). De manera paralela, evaluaciones ambientales como el análisis de ciclo de vida (LCA, sigla del nombre en inglés) se incorporan con mayor frecuencia en la valoración de rutas de CCUS para alinearlas con principios de economía circular y transiciones energéticas sostenibles (Leonzio *et al*., 2023). Pese a la complejidad intrínseca, los avances computacionales han viabilizado la simulación de redes a gran escala, en especial cuando se combina con análisis de escenarios y cuantificación de incertidumbre (Y. Li *et al*., 2022; Niu *et al*., 2022). La incorporación de gemelos digitales y analítica apoyada por inteligencia artificial (IA) está elevando la capacidad de reconfiguración en tiempo real de estos sistemas (Al-Sakkari *et al*., 2024). Estos progresos resultan particularmente pertinentes ante la presión creciente por definir trayectorias creíbles hacia la neutralidad climática.

La IA se ha consolidado como un complemento robusto de la optimización matemática en la planeación de CCUS (Cairone *et al*., 2025). Métodos de aprendizaje automático (ML) como las redes neuronales de memoria a largo plazo (LSTM) y la biblioteca eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) han probado su utilidad para pronosticar perfiles de emisiones, clasificar fuentes industriales y respaldar la ubicación predictiva de activos bajo condiciones operativas cambiantes (Al-Sakkari *et al*., 2024). Modelos generativos como GPT-4o han sido explorados recientemente para la planeación logística conceptual, la simulación de escenarios y el diseño territorial sujeto a restricciones (L. Li, Liu, *et al*., 2024; Chen *et al*., 2025). Así mismo, el modelado basado en agentes (ABM, sigla del nombre en inglés) y el aprendizaje por refuerzo se emplean para representar la toma de decisiones descentralizada entre los actores de CCUS, reforzando la flexibilidad y la resiliencia del sistema. Estas herramientas son particularmente valiosas en fases iniciales, cuando la incertidumbre es mayor y se requiere máxima flexibilidad (Uddin *et al*., 2025). No obstante, la mayoría de las aplicaciones se concentran en países de altos ingresos, lo que deja una brecha en su adopción para estrategias de CCUS en América Latina.

El análisis geoespacial constituye otro pilar del diseño de CCUS, al posibilitar la identificación de clústeres emisores, corredores de transporte y reservorios geológicos (K. Li *et al*., 2024). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los algoritmos de agrupamiento se han utilizado para detectar patrones óptimos de localización y evaluar limitaciones del terreno (Sadhukhan *et al*., 2025; Nie *et al*., 2023). Estudios recientes promueven marcos espaciales integrados que combinen datos de emisiones industriales, cartografía de infraestructura e indicadores socioeconómicos para sustentar planes maestros nacionales de CCUS (Al-Sakkari *et al*., 2024; Gupta *et al*., 2024). En países con marcada diversidad topográfica, las variables espaciales pueden incidir de forma significativa en costos de infraestructura, aceptación social y tiempos de implementación. Hoy en día, herramientas geoespaciales avanzadas permiten generar redes sintéticas y simular escenarios de despliegue, con frecuencia apalancadas por algoritmos de diseño asistidos por IA (Elaouzy & Zaabout, 2025). Dichos enfoques son determinantes para orientar decisiones tempranas antes de comprometer recursos de inversión.

En Colombia, distintos estudios de descarbonización y transición energética han subrayado la pertinencia de integrar redes de CCUS. El compromiso de reducción del 51 % de emisiones para 2030, establecido en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, sigla del nombre en inglés) actualizadas (Raihan, 2023), obliga a contemplar medidas de mitigación adicionales a la expansión de renovables. El país alberga clústeres de alta intensidad emisora, especialmente en los segmentos de cemento, carbón, petroquímica y refinación (Delgado *et al*., 2020). Estos polos brindan oportunidades para la captura in situ, pero requieren estrategias logísticas integradas que habiliten transporte costo-efectivo hacia cuencas de almacenamiento costa afuera o en tierra firme (Suárez Bermúdez *et al*., 2025; Liu *et al*., 2023; X. Zhang *et al*., 2022). Existe potencial geológico para almacenar CO_2 en cuencas como Cesar-Ranchería, Magdalena Medio y Sinú-San Jacinto; sin embargo, la caracterización detallada de reservorios continúa en etapas preliminares (Mora-Bohórquez *et al*., 2025). En consecuencia, la planeación de CCUS en el país permanece en un plano conceptual, condicionada por limitaciones de datos, fragmentación institucional y ausencia de marcos regulatorios habilitantes.

La literatura académica y técnica más reciente ha empezado a trazar posibles flujos de CO_2 y a analizar rutas de transporte mediante técnicas de agrupamiento basadas en SIG (Zhou *et al*., 2024). A modo de ejemplo, Suárez Bermúdez *et al*. (2025) estudian rutas de captura-transporte-almacenamiento en el Caribe colombiano, destacando tanto la capacidad geológica como las barreras logísticas. A su vez, Plazas-Niño *et al*. (2024) señalan que incorporar redes de CCUS en las estrategias energéticas nacionales exige coordinación específica entre entidades territoriales, agencias energéticas y autoridades ambientales. La dispersión industrial, la topografía montañosa y la limitada inversión en infraestructura complejizan el diseño de la red. En este contexto, los modelos de planificación temprana —apoyados en IA y analítica espacial— ofrecen una vía factible para alinear el potencial tecnológico con las realidades territoriales. Tales modelos también permiten identificar clústeres prioritarios, simular cronogramas de despliegue y ponderar compromisos socioeconómicos.

Aunque el reconocimiento avanza, las redes de CCUS siguen prácticamente ausentes de los instrumentos formales de planeación energética y de las estrategias de financiamiento en Colombia. No se dispone de una hoja de ruta nacional, ni de una definición legal sobre la responsabilidad del almacenamiento de carbono, ni de un proceso integrado de permisos para infraestructura intersectorial. Con todo, la disponibilidad de datos espaciales, inventarios de emisiones y herramientas de IA abre una ventana de oportunidad para la planeación conceptual. En el presente documento de trabajo exploramos cómo el pronóstico asistido por IA (LSTM/XGBoost), el agrupamiento geoespacial y el modelado generativo (GPT-4o) pueden informar el diseño temprano

de redes de CCUS en Colombia. El propósito es aportar un marco replicable, flexible y basado en evidencia para orientar futuras decisiones de política e inversión. De ello se desprende la pregunta central de investigación: ¿cómo integrar inteligencia artificial y herramientas geoespaciales para respaldar la planificación conceptual de la infraestructura de CCUS en Colombia ante escasez de datos e incertidumbre institucional?

Este trabajo presenta un marco teórico para el diseño estratégico de cadenas de suministro de CCUS en Colombia, sustentado en una revisión bibliográfica exhaustiva, en la caracterización territorial de los principales clústeres emisores y en el uso exploratorio de herramientas de IA para simular configuraciones logísticas ajustadas a las condiciones nacionales. A diferencia de los enfoques de optimización basados en programación entera mixta, se adopta aquí una perspectiva cualitativa y conceptual que sienta bases para futuras investigaciones y estudios de caso. El marco integra componentes clave, como análisis multicriterio, gobernanza territorial, factibilidad regulatoria y capacidad adaptativa de las infraestructuras existentes, en sintonía con instrumentos de política como la Hoja de Ruta de Transición Energética y el Plan Nacional de Desarrollo de Colombia (Pinedo-López *et al*., 2024).

El estudio aporta de manera original a la literatura de gestión del carbono al proponer un esquema guiado por lo geoespacial y asistido por IA para conceptualizar cadenas de suministro de CCUS en economías emergentes, tomando a Colombia como caso. Mientras gran parte de los aportes académicos se centra en modelación tecnoeconómica detallada y optimización matemática (p. ej., programación lineal de enteros mixtos [MILP, sigla del nombre en inglés], programación multiobjetivo), aquí se abordan las etapas preliminares de planeación, donde la escasez de datos, la fragmentación institucional y la incertidumbre regulatoria son dominantes pero determinantes para decidir.

La contribución principal consiste en integrar datos geoespaciales, inventarios de emisiones y técnicas de IA para identificar clústeres industriales emisores, anticipar flujos futuros de CO_2 y generar configuraciones logísticas hipotéticas de manera ligera en cómputo y de fácil acceso. En concreto, se plantea un doble uso de la IA: 1) aprendizaje supervisado —XGBoost y LSTM— para pronosticar flujos de carbono a partir de rasgos históricos, espaciales e industriales, y 2) modelos generativos —GPT-4o— para simular configuraciones alternativas de red y valorar su viabilidad conceptual con criterios sensibles al contexto.

En segundo término, el trabajo se focaliza explícitamente en el tejido industrial y territorial colombiano, cerrando una brecha crítica en la investigación latinoamericana sobre redes de CCUS. Si bien existen estudios globales sobre estrategias regionales de despliegue —como Europa (Shirafkan *et al*., 2025) o China (Gu *et al*., 2024)—, pocos trabajos ajustan supuestos, variables o escenarios a las realidades de economías andinas o tropicales en desarrollo. En contraste, aquí se incorporan patrones espaciales de industrialización, cuellos de botella logísticos, asimetrías regulatorias y potencial geológico de almacenamiento propios de las regiones subnacionales de Colombia.

En tercer lugar, la contribución metodológica radica en mostrar cómo construir herramientas de apoyo a la decisión en fases tempranas sin depender de solucionadores numéricos de gran escala ni de software propietario de optimización. Este planteamiento reduce barreras de entrada para instituciones y responsables de política en el Sur Global, especialmente cuando las inversiones iniciales y las capacidades técnicas son limitadas. El flujo metodológico —del agrupamiento geoespacial y el pronóstico de emisiones a la simulación logística generativa— puede fungir como plantilla replicable para la planeación conceptual de CCUS en otros países con restricciones semejantes.

Por último, el trabajo se alinea con tendencias emergentes de descarbonización digital, donde la IA deja de ser solo un apoyo computacional para convertirse en un socio cognitivo al imaginar

infraestructuras resilientes, adaptativas y contextualmente pertinentes de bajas emisiones. El uso de IA generativa basada en lenguaje (como GPT-4o) como copiloto de planificación expresa una dimensión novedosa y aún poco explorada de los sistemas inteligentes aplicados a transiciones sostenibles.

Revisión literaria

El despliegue de redes de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) ha adquirido una atención cada vez mayor al consolidarse como una de las rutas principales para descarbonizar economías industriales. En la última década, se ha conformado un cuerpo creciente de literatura que aborda el diseño tecnoeconómico de las cadenas de suministro de CCUS, examinando configuraciones óptimas para la captura, transporte y almacenamiento de CO_2 a través de metodologías de programación matemática y de análisis de ciclo de vida (LCA). Investigaciones pioneras evidencian el valor del método de MILP en la estructuración de cadenas de suministro de CCUS bajo restricciones de costo, emisiones y disponibilidad tecnológica (F. Wang *et al*., 2023; Wiltink *et al*., 2025). De igual modo, otros estudios han ampliado el alcance del modelado incluyendo incentivos económicos, esquemas de comercio de carbono e integración con energías renovables.

En años recientes, la literatura ha empezado a dar mayor relevancia a la incorporación de dimensiones geoespaciales y territoriales en la planificación de redes de CCUS, por ejemplo: la aplicación de técnicas de agrupamiento espacial para identificar combinaciones óptimas entre fuentes y sumideros de CO_2 en Europa, considerando la infraestructura existente y las barreras topográficas (Vulin *et al*., 2023). De forma complementaria, se han realizado evaluaciones regionales de densidad de emisiones y de potencial de almacenamiento geológico, recurriendo a herramientas de SIG para orientar decisiones estratégicas de localización (Zhou *et al*., 2024). Estos análisis recalcan la importancia crítica de la geografía en la conformación de esquemas logísticos viables de CCUS, sobre todo en contextos de topografía compleja o de clústeres industriales dispersos.

El aprendizaje automático también se ha posicionado como una herramienta potente para pronosticar flujos de carbono y sustentar la planificación de CCUS. Autores han usado modelos de LSTM para estimar las emisiones futuras de clústeres industriales en la región del Golfo bajo diversos escenarios de descarbonización (Shen *et al*., 2024). Así mismo, la biblioteca XGBoost y otros métodos de ensamble han sido empleados para proyectar tasas de captura de CO_2 y optimizar variables de decisión en ambientes dinámicos (Al-Sakkari *et al*., 2024). Dichas técnicas se destacan por su capacidad de manejar relaciones no lineales, incertidumbre y bases de datos incompletas o dispersas, que son condiciones comunes en economías emergentes como la colombiana.

Si bien los modelos predictivos han demostrado utilidad en la identificación de tendencias de emisiones, la aplicación de IA generativa en la planificación de la infraestructura de CCUS continúa siendo incipiente (L. Li, Liu, *et al*., 2024). Aun así, estudios recientes han comenzado a emplear enfoques generativos para simular configuraciones alternativas de red, especialmente en fases tempranas de planificación, cuando la información disponible es limitada (Boone *et al*., 2025; S. Wang & Zhang, 2025; Patro *et al*., 2025). Modelos similares a GPT han sido propuestos para la creación de escenarios, simulación de políticas y desarrollo conceptual, aportando nuevas rutas para la planificación participativa y adaptativa (Fan *et al*., 2025). Aunque su uso en redes de CCUS aún está en fase inicial, la convergencia entre generación de lenguaje natural y restricciones geoespaciales y técnicas abre un campo prometedor para la investigación.

En el caso de América Latina, las aportaciones a la literatura sobre redes de CCUS siguen siendo escasas. Solo un número limitado de estudios ha abordado los retos específicos de la región, como la baja madurez de las políticas,

las brechas significativas de infraestructura y la falta de coordinación institucional. Una de las pocas investigaciones que han examinado el potencial de CCUS en Colombia (Delgado *et al*., 2020), subraya las oportunidades industriales y geológicas, pero sin incorporar un marco de diseño orientado al sistema (Suárez Bermúdez *et al*., 2025). Esta carencia pone de manifiesto la necesidad de marcos conceptuales ajustados a las particularidades territoriales, tecnológicas y regulatorias de los países del Sur Global.

En términos generales, la literatura sobre las redes de CCUS ha experimentado una expansión notable en los últimos años, reflejando su papel esencial en la descarbonización de sectores de difícil mitigación y en la consecución de la neutralidad de carbono. Sin embargo, la articulación entre planificación asistida por IA, agrupamiento geoespacial de emisiones y diseño logístico a escala nacional sigue fragmentada. Esta sección integra los principales avances en tres áreas: 1) optimización y diseño de cadenas de suministro en sistemas de CCUS; 2) aprendizaje automático y pronóstico de flujos de CO_2, y 3) IA generativa y planificación conceptual de infraestructuras. Se enfatiza, además, cómo estos enfoques pueden adaptarse a los países del Sur Global, como es el caso colombiano.

Modelos de optimización y diseño de cadenas de suministro de CCUS

Las cadenas de suministro de CCUS se han abordado principalmente a través de técnicas de optimización matemática, con especial relevancia del método de MILP y de las formulaciones multiobjetivo. Dichos modelos buscan ubicar de manera óptima las instalaciones de captura, transporte y almacenamiento, teniendo en cuenta limitaciones de costo, intensidad de carbono, capacidad y disponibilidad de infraestructura (Nie *et al*., 2023; Kabir *et al*., 2024). Algunos autores han propuesto un modelo de optimización en dos fases que consideraba la compatibilidad entre fuentes de captura y sumideros, con un énfasis particular en minimizar las compensaciones económicas y ambientales (S. Zhang *et al*., 2020). A su vez, otros autores aplicaron un enfoque de optimización robusta con el fin de capturar la incertidumbre en la asignación de permisos de carbono en clústeres multirregionales (Y. Li *et al*., 2023).

Por su parte, Hanson *et al*. (2025) desarrollaron un modelo de expansión orientado a la maximización de beneficios que busca optimizar la red de CCUS a lo largo del tiempo, equilibrando la mitigación de emisiones con la factibilidad económica. En paralelo, Rakhiemah *et al*. diseñaron un marco multiescala que integra captura de carbono, transporte y recuperación mejorada de petróleo (EOR, sigla del nombre en inglés), resaltando su aplicabilidad en regiones productoras de hidrocarburos (Rakhiemah & Xu, 2022). A pesar de su rigurosidad, estos modelos requieren datos de alta calidad, recursos computacionales avanzados y apoyo institucional completo, condiciones poco frecuentes en países de ingresos bajos y medios. Aunque sofisticados, los modelos de optimización rara vez incorporan la diversidad espacial y los retos logísticos que caracterizan a países con redes industriales fragmentadas o infraestructuras limitadas, como Colombia. En respuesta, investigaciones recientes han comenzado a integrar los SIG en la definición de variables de optimización, lo que permite diseños más realistas y adaptados a las condiciones regionales (Zhou *et al*., 2024).

Así mismo, la literatura de optimización ha tratado al CO_2 como un flujo homogéneo, ignorando diferencias en el tipo de emisión (biogénica vs. fósil), en la concentración de corrientes y en la intermitencia temporal (Sadhukhan *et al*., 2025). Investigaciones recientes han empezado a considerar esta heterogeneidad mediante el uso de modos de transporte modulares y la activación flexible de nodos, aunque tales innovaciones siguen siendo poco frecuentes en escenarios latinoamericanos (Shirafkan *et al*., 2025; Leonzio *et al*., 2020).

Aprendizaje automático para pronóstico y dinámica de emisiones de CO_2

La aplicación de métodos de aprendizaje automático (ML) en el ámbito de CCUS se ha intensificado, con el objetivo de pronosticar emisiones de CO_2, estimar potenciales de captura y apoyar la toma de decisiones bajo incertidumbre. Algoritmos supervisados como gradient boosting machines (p. ej., XGBoost), bosques aleatorios y máquinas de vectores de soporte se han utilizado para modelar las relaciones entre la actividad industrial y la generación de emisiones (Al-Sakkari *et al*., 2024; Cairone *et al*., 2025; Patro *et al*., 2025). Estos enfoques resultan particularmente valiosos en entornos con limitaciones de datos, gracias a su robustez ante ruido y su capacidad para capturar interacciones no lineales. La ventaja fundamental de los ML radica en procesar conjuntos de datos heterogéneos y dispersos, circunstancias comunes en las etapas iniciales de planificación en países con sistemas de monitoreo incipientes. Kashif y Ślepaczuk (2025), por ejemplo, evidencian cómo los modelos de LSTM superan a las técnicas de regresión o ARIMA en la predicción de emisiones de CO_2 en contextos con rupturas estructurales y choques de política. Algunos trabajos integran resultados de ML en sistemas de apoyo a la decisión, que posteriormente sirven como insumos para simulaciones tecnoeconómicas o para modelado probabilístico de oferta y demanda (Nassabeh *et al*., 2024; Hosseinifard *et al*., 2025). Este carácter modular es esencial en contextos donde la implementación completa de MILP no resulta viable. Sin embargo, la falta de interpretabilidad de los modelos black-box representa una limitación clave que dificulta su adopción en procesos regulatorios y de formulación de políticas.

Las LSTM, en particular, diseñadas para conservar dependencias de largo plazo en series temporales, resultan adecuadas para pronosticar emisiones influidas por factores estacionales o cíclicos (J. Zhang *et al*., 2025). Combinadas con redes de convolución de grafos (GCN) (Kaya *et al*., 2025), las LSTM han demostrado capacidad para captar dependencias temporales en datos de emisiones, proporcionando estimaciones más precisas que los modelos clásicos de series de tiempo. Entre sus aplicaciones, se incluyen la proyección de cargas de captura en plantas industriales, el pronóstico de volúmenes de transporte de CO_2 y la identificación de picos de emisión derivados de cambios en políticas o en la producción.

Para abordar los desafíos de interpretabilidad, se han propuesto con mayor frecuencia métodos como SHAP (SHapley Additive exPlanations) y redes neuronales recurrentes (RRN) aplicados al pronóstico de emisiones vinculadas a CCUS (Keer *et al*., 2025; Mohammadian *et al*., 2024). Sin embargo, la mayor parte de los estudios se concentra en países con sistemas de recolección de datos robustos, como China, Reino Unido o Estados Unidos, mientras que hay escasa evidencia de aplicación sistemática en América del Sur. Estos avances señalan una tendencia hacia marcos híbridos de modelado, en los cuales los resultados de ML alimentan las restricciones u objetivos de modelos de optimización tradicionales. Aun así, la implementación de tales enfoques en contextos nacionales reales es todavía limitada, especialmente en América Latina, donde las deficiencias en datos, la incertidumbre regulatoria y la fragmentación institucional son comunes.

IA generativa y planificación conceptual de infraestructura

Si bien los modelos de ML se emplean cada vez más con fines de predicción, el uso de IA generativa en el diseño de infraestructuras de CCUS es todavía reducido (Al-Sakkari *et al*., 2024). Sin embargo, se trata de un ámbito con un potencial notable, sobre todo en fases iniciales de planificación bajo condiciones de elevada incertidumbre. Los modelos transformadores generativos preentrenados (GPT) (Chen *et al*., 2025), como GPT-4o, ofrecen la posibilidad de generar configuraciones de red plausibles, escenarios de política y estrategias de implementación a partir de indicaciones de alto nivel y datos no estructurados. La irrupción de la

IA generativa (GenAI), en particular, los modelos de lenguaje a gran escala (LLMs), como GPT-4o, abre una frontera novedosa en la planificación de infraestructuras (L. Li, Zhu, *et al*., 2024; Al-khatib *et al*., 2024). Aunque aún, en fases preliminares, estas herramientas han demostrado utilidad en la generación de escenarios de planificación, en la elaboración de diseños conceptuales e, incluso, en diagnósticos de prefactibilidad en campos como la arquitectura, los sistemas energéticos y la movilidad (Ren *et al*., 2025).

En otros sectores, los modelos generativos han servido para simular distribuciones arquitectónicas (Rianto *et al*., 2025), alternativas de rutas (Boone *et al*., 2025) y mapeo de actores (Obreja *et al*., 2025), incluso en ausencia de especificaciones de diseño detalladas (p. ej., asistentes de planificación urbana basados en GPT) (Jiang *et al*., 2025). En el ámbito de las redes de CCUS, estas capacidades podrían trasladarse a la generación de escenarios para trazados de tuberías, la lógica de ubicación de centros de almacenamiento o las evaluaciones preliminares de prefactibilidad de clústeres regionales, procesos que actualmente son costosos y dependen en gran medida de supuestos (Jun *et al*., 2023). Pese a su limitada implementación, la integración de estas herramientas podría democratizar la planificación y reducir las barreras de entrada para países como Colombia, para así facilitar su participación en procesos de descarbonización a gran escala.

Del mismo modo, estudios han comenzado a emplear gemelos digitales conceptuales y diagnósticos impulsados por IA para evaluar la resiliencia y robustez de sistemas (Yoon *et al*., 2025; Bolbotinović *et al*., 2025). Dichas herramientas facilitan un diseño adaptativo e iterativo incluso en ausencia de conjuntos de datos completos. Aunque aún incipiente, la literatura más reciente indica que GenAI podría emplearse para generar redes plausibles de transporte de CO_2, proponer configuraciones hipotéticas de infraestructura y ejecutar iteraciones iniciales de diseño sin requerir información completa (Boone *et al*., 2025). En este sentido, propuestas generadas por IA pueden funcionar como punto de partida para procesos de consulta con actores o para planificación participativa, particularmente en entornos descentralizados como el colombiano, donde los enfoques verticales resultan menos efectivos.

Además, GenAI puede convertirse en un puente entre el conocimiento técnico y la gobernanza territorial. A través del procesamiento de lenguaje natural y el análisis semántico, estos modelos pueden sintetizar marcos regulatorios, traducir restricciones técnicas a lógicas de planificación y simular respuestas a cambios de política, funciones de alto valor en regiones con capacidades institucionales fragmentadas. El trabajo de Zhang *et al*. (2025) sobre diseño de CCUS orientado a la seguridad apunta en esa dirección, al explorar cómo las simulaciones digitales pueden co-construirse entre planificadores y algoritmos.

No obstante, los modelos generativos requieren una ingeniería de prompts cuidadosa y procesos de validación rigurosos, sobre todo cuando se aplican a infraestructuras críticas. Más que sustituir la toma de decisiones, deben concebirse como copilotos de planificación. Su integración con modelos tradicionales, mediante arquitecturas que involucren al ser humano en el bucle (human-in-the-loop), constituye una línea prometedora de investigación que aún no se ha explotado plenamente en sistemas de CCUS.

A pesar de los progresos globales, todavía existen vacíos importantes. En particular, hay una carencia de estudios integradores que articulen el pronóstico basado en ML, el agrupamiento geoespacial y la simulación generativa dentro de un marco coherente de planificación. Así mismo, la mayor parte de los modelos de CCUS asumen madurez institucional y capacidad financiera, condiciones que no se encuentran en el contexto colombiano. Muy pocos trabajos incluyen perfiles de emisiones de América Latina, limitaciones de infraestructura o restricciones normativas.

El presente estudio responde a esas brechas, proponiendo un marco híbrido, con sustento teórico

y adaptado a la realidad colombiana. Se basa en la lógica espacial de las emisiones georreferenciadas, amplía los hallazgos mediante aprendizaje automático y plantea la innovación de incorporar IA generativa como coprotagonista conceptual en la planificación. Aunque este enfoque no resuelve en su totalidad los retos técnicos del modelado, sí proporciona un punto de entrada estructurado para el diseño estratégico de CCUS en escenarios de incertidumbre. Este artículo plantea un marco conceptual híbrido que combina agrupamiento geoespacial de emisiones, pronóstico de flujos de CO_2 mediante ML y simulación logística asistida por IA generativa, específicamente adaptado al caso colombiano. En lugar de buscar la optimización definitiva, la propuesta apunta a apoyar la exploración temprana, reducir la incertidumbre inicial y facilitar la participación informada de los actores.

Metodología

El marco metodológico propuesto en este estudio está diseñado para apoyar la planificación temprana de redes de CCUS en el contexto colombiano. Integra tres componentes centrales —análisis geoespacial, pronóstico basado en aprendizaje automático y simulación asistida por IA generativa— en un proceso secuencial pero adaptable. Este enfoque reconoce tanto la complejidad técnica de los sistemas de CCUS como las limitaciones prácticas de datos, infraestructura y gobernanza en economías emergentes. El objetivo final es producir un conjunto de escenarios informados, territorialmente fundamentados y conceptualmente sólidos que puedan orientar el desarrollo futuro de infraestructura y la formulación de políticas en Colombia.

El primer componente se centra en la identificación geoespacial de clústeres industriales emisores y zonas de almacenamiento potencial a lo largo del territorio nacional. Esta fase inicia con la recopilación e integración de datos históricos de emisiones de CO_2, registros de infraestructura y mapas de aptitud geológica. Fuentes como el Ideam y el Global Carbon Atlas proporcionan métricas de emisiones de referencia, mientras registros nacionales mantenidos por la UPME y el Servicio Geológico Colombiano suministran información crítica sobre actividades industriales y potencial de almacenamiento subterráneo. El análisis geoespacial se realiza mediante técnicas como la estimación de densidad por kernel para detectar focos de emisión y algoritmos de agrupamiento espacial (p. ej., DBSCAN u OPTICS) para definir aglomeraciones industriales con perfiles coherentes de CO_2. Este proceso permite crear una tipología georreferenciada de corredores de captura-almacenamiento que reflejen tanto las intensidades actuales de emisión como las restricciones de infraestructura. Además, se realiza un análisis multicriterio superpuesto para evaluar la viabilidad técnica de opciones de almacenamiento cercanas, incluyendo acuíferos salinos y reservorios de hidrocarburos agotados. Esta perspectiva territorial garantiza que las consideraciones logísticas y físicas se integren desde el inicio, corrigiendo una de las principales deficiencias de los modelos de optimización genéricos que suelen ignorar la geografía.

Tras esta delimitación espacial, el segundo componente implica el pronóstico de flujos futuros de CO_2 para cada clúster mediante técnicas supervisadas de aprendizaje automático. Este pronóstico resulta esencial para dimensionar y programar en el tiempo el despliegue de infraestructura de CCUS, en particular bajo escenarios de crecimiento industrial, transición energética o regulación climática. Se aplican dos estrategias de modelado complementarias: XGBoost y LSTM. La biblioteca XGBoost se emplea para estimar el potencial de captura de CO_2 a corto y mediano plazo, utilizando variables transversales, como producción industrial, consumo energético por sector e indicadores macroeconómicos como PIB e intensidad energética. Por su parte, los modelos de LSTM se implementan para capturar dependencias temporales de largo alcance y no linealidades dinámicas presentes en las trayectorias de emisiones, lo que los hace adecuados para pronósticos de largo plazo bajo incertidumbre. Estos modelos se entrenan con

datos trimestrales y anuales del periodo 2000-2022, estandarizados y depurados para asegurar consistencia y confiabilidad. El desempeño se evalúa mediante métricas como el error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE), mientras la interpretabilidad se mejora con técnicas como SHAP, que permiten jerarquizar variables y comprender predicciones de caja negra. El resultado de esta fase es una estimación sólida y basada en datos de los volúmenes anuales de flujo de CO_2 por clúster de emisiones, que servirá como insumo cuantitativo para la fase final de diseño.

El tercer componente de la metodología introduce la IA generativa (GenAI) como herramienta novedosa para asistir en el diseño conceptual de configuraciones logísticas de CCUS. Esta etapa aprovecha las capacidades de modelos de lenguaje a gran escala, específicamente GPT-4o, para generar escenarios de infraestructura a partir de indicaciones estructuradas derivadas de los resultados de las dos fases anteriores. Dichas indicaciones incluyen descripciones detalladas de las características de cada clúster, volúmenes de CO_2 proyectados, distancias a sitios de almacenamiento viables y la infraestructura de transporte existente. El modelo generativo produce entonces esquemas textuales que simulan redes logísticas potenciales, proponiendo configuraciones como ductos centralizados, bucles de transporte modulares o rutas de activación por fases. Cada salida generada se evalúa mediante revisión de expertos, heurísticas de factibilidad y verificaciones de alineación con los planes nacionales de energía y clima de Colombia. Se conservan los escenarios que muestran consistencia interna, realismo técnico y alineación política, mientras que se descartan los redundantes o implausibles. Este proceso se itera múltiples veces para generar un conjunto de alternativas y esquemas conceptuales sensibles al contexto que reflejan diferentes niveles de inversión, madurez tecnológica y compromiso regulatorio.

Es importante destacar que esta etapa generativa no pretende sustituir el diseño de ingeniería detallado ni el modelado de optimización, sino servir como un mecanismo de apoyo a la decisión de bajo costo y alta flexibilidad durante la fase exploratoria. Al aprovechar GenAI para la generación de escenarios, los actores pueden visualizar futuros plausibles e iniciar diálogos sustentados en proyecciones científicamente fundamentadas pero accesibles. Así mismo, este enfoque enfrenta un cuello de botella común en países en desarrollo, donde suelen faltar capacidades de modelado o datos a gran escala, pero donde la necesidad de planificación es urgente.

La integración de estos tres componentes —mapeo territorial, modelado predictivo y simulación generativa— concluye en la síntesis de una caja de herramientas de planificación adaptada al contexto colombiano. Esta caja incluye mapas de alta resolución de los clústeres emisores, proyecciones de flujo para cada clúster en un horizonte definido de planeación y un portafolio de escenarios logísticos generados conceptualmente. También incorpora lineamientos de política relacionados con la priorización regulatoria, la programación de inversiones y la coordinación institucional. La modularidad de esta metodología permite su actualización a medida que se disponga de nuevos datos o que evolucionen las estrategias nacionales, para así garantizar su relevancia y adaptabilidad en el tiempo.

Al combinar rigurosidad técnica con sensibilidad contextual, la metodología propuesta busca avanzar en el estado del arte de la planificación de CCUS no solo en Colombia, sino también en otros países del Sur Global que enfrentan desafíos similares de infraestructura y gobernanza. Su aporte radica en su visión integradora, en su realismo operativo y en su capacidad de generar insumos prácticos a partir de una inteligencia híbrida —humana, algorítmica e institucional—.

Resultados

Se prevé que la puesta en marcha del marco metodológico propuesto produzca resultados multidimensionales en los planos técnico, espacial,

institucional y estratégico. Aunque el modelo se encuentra por ahora en una etapa teórica, su diseño integrador —que combina agrupamiento geoespacial, pronóstico con aprendizaje automático y simulación mediante IA generativa— lo ubica como una herramienta de alto potencial para impulsar la planificación temprana de CCUS en Colombia. Si bien el marco aún no ha sido aplicado empíricamente, la confluencia de agrupamiento espacial, proyección con machine learning y planificación asistida por IA generativa ofrece una plataforma sólida para simular escenarios reales de despliegue en regiones con fragmentación institucional e infraestructural. Esta sección examina los resultados esperados de cada componente y discute sus implicaciones más amplias, apoyándose en comparaciones con aplicaciones internacionales previas.

Un primer resultado clave previsto es la delimitación espacial de clústeres emisores de alta prioridad, integrando no solo la intensidad de CO_2, sino también la proximidad a formaciones de almacenamiento viables y a infraestructura logística. Se anticipa que surjan entre cinco y ocho clústeres como regiones prioritarias, incluidos los polos industriales a lo largo de la cuenca del río Magdalena, el corredor del Valle del Cauca, el complejo Bogotá-Sabana y nodos costeros como Barranquilla y Cartagena. Tales hallazgos guardarían coherencia con las tipologías espaciales identificadas en otros estudios nacionales —como los del Reino Unido (Leonzio *et al*., 2020), India (Gupta *et al*., 2024) y China (Liu *et al*., 2023)— que evidenciaron que los efectos de concentración y la minimización de los costos de transporte son determinantes para escalar redes de CCUS. La capacidad de localizar cuencas emisoras en función de restricciones de infraestructura (p. ej., carreteras, ductos, redes eléctricas) y de la capacidad geológica es especialmente pertinente en el contexto colombiano, donde el legado de una planificación territorial segmentada y un desarrollo industrial desigual limita el uso de modelos de optimización genéricos.

También se espera que los resultados de pronóstico aporten información sustantiva. Al implementar modelos de LSTM para la predicción temporal de largo plazo y la biblioteca XGBoost para el análisis multifactorial de corto plazo, el modelo podrá proyectar flujos de captura de CO_2 bajo diversas condiciones económicas, energéticas y regulatorias. Aplicaciones anteriores de estos enfoques —como las de Gu *et al*. (2024) en el sector siderúrgico chino o de Hosseinifard *et al*. (2025) en complejos petroquímicos de Medio Oriente— mostraron alta precisión predictiva (RMSE <10 %) y una interpretabilidad relevante mediante análisis con SHAP. Se prevé que en Colombia un enfoque análogo permita identificar los impulsores clave de las emisiones, como la mezcla energética sectorial, la evolución regulatoria y la volatilidad macroeconómica. Estas proyecciones suministrarán insumos cruciales para definir el dimensionamiento de la infraestructura, la secuenciación de corredores de transporte y la priorización de inversiones. Así mismo, la incorporación de técnicas de explicabilidad facilitará la transparencia decisional y la apropiación institucional, una brecha frecuentemente señalada en estudios tecnoeconómicos de CCUS (Hanson *et al*., 2025; Moioli *et al*., 2024).

Un resultado especialmente novedoso y prometedor es el conjunto de escenarios logísticos conceptuales generados mediante modelos de lenguaje de gran escala como GPT-4o. A partir de los datos espaciales y de flujos, estas simulaciones generativas deberían producir planos de infraestructura plausibles y sensibles al contexto, que incluyan redes troncales centralizadas, arquitecturas modulares descentralizadas y estrategias de corredores híbridos. Enfoques semejantes se han explorado recientemente en entornos de simulación para la planificación de la transición energética (Nie *et al*., 2023) y para el diseño de trazados de infraestructura (Ostovari *et al*., 2023), donde la IA generativa demostró acelerar la ideación y ampliar la cobertura conceptual, manteniendo a la vez las restricciones técnicas codificadas en la estructura de los prompts. En el caso colombiano, tales simulaciones podrían ser herramientas potentes para la articulación con actores, al facilitar procesos de consulta, discusiones

de factibilidad y anticipación regulatoria. Esto cobra mayor relevancia ante las demoras frecuentes en proyectos de infraestructura por asimetrías de planificación, brechas de aceptación social y fragmentación institucional.

Más allá de los productos individuales, la integración metodológica en un kit de apoyo a la decisión flexible y modular representa una contribución sistémica de primer orden. Se espera que dicho kit integre inteligencia espacial, analítica predictiva y diseño generativo en una sola interfaz, permitiendo a planificadores, inversionistas y responsables de política navegar entre trade-offs (intercambio, compensación o renuncia), poner a prueba supuestos y comparar escenarios. La literatura reciente ha defendido este tipo de marcos integrados como habilitadores críticos para escalar las redes de CCUS en economías en desarrollo (Raihan, 2023). En Colombia, una herramienta de esta naturaleza podría cerrar la brecha entre los compromisos climáticos nacionales —como las NDC y la Estrategia 2050— y la capacidad de ejecución operativa a nivel subnacional, donde a menudo faltan coherencia técnica o granularidad en los inventarios de emisiones.

En un plano sistémico, la integración de estos resultados se proyecta en un conjunto de herramientas de apoyo a la decisión flexible y adaptado a las realidades territoriales e institucionales del país. Este toolkit no solo permitiría a planificadores y decisores visualizar redes de CCUS futuras bajo supuestos diversos, sino también comparar escenarios considerando restricciones presupuestarias, ambientales o regulatorias. Además, serviría como base de conocimiento para futuros ejercicios de optimización y modelación tecnoeconómica, a medida que los proyectos maduren y se disponga de datos más granulares. Desde la perspectiva de política pública, los resultados esperados podrían fortalecer de manera significativa la coordinación entre estrategias nacionales como el Plan Energético Nacional (PEN), la Estrategia de Largo Plazo 2050 y los marcos de ordenamiento territorial subnacional. Al identificar polos de emisión y corredores logísticos, el marco puede respaldar incentivos regulatorios focalizados, alianzas público-privadas y esquemas de cofinanciación de infraestructura. Igualmente, puede informar iniciativas de cooperación internacional enfocadas en financiamiento climático, transferencia tecnológica y construcción de capacidades en consonancia con los compromisos NDC de Colombia.

Así mismo, la capacidad del modelo para expandirse de forma modular y adaptarse a distintos territorios lo vuelve altamente pertinente para aplicaciones transfronterizas y subregionales en América Latina. Por ejemplo, estudios recientes sobre estrategias de CCUS en el Cono Sur (Bao *et al*., 2023) y en la región andina (Suárez Bermúdez *et al*., 2025) han subrayado la necesidad de marcos interoperables que se ajusten a arreglos institucionales diversos, normas legales diferenciadas y agendas de desarrollo heterogéneas. En consecuencia, la metodología propuesta —aunque pilotada en Colombia— podría transferirse o adaptarse a países vecinos con desafíos y estructuras de emisión semejantes, fortaleciendo la cooperación regional bajo plataformas como la Alianza Latinoamericana para la Captura de Carbono.

En conjunto, los resultados esperados de la implementación de este marco trascienden los pronósticos técnicos o los mapeos espaciales. Más bien, abarcan un conjunto más amplio de herramientas basadas en conocimiento y de apoyo a la decisión que pueden acelerar la formulación, la consulta y la ejecución de proyectos de CCUS en Colombia. La incorporación de IA en las etapas de pronóstico y planificación no solo potencia el desempeño y la escalabilidad del modelo, sino que también amplía los límites epistemológicos del desarrollo de infraestructura bajo incertidumbre. Estas contribuciones, aunque pendientes de validación empírica, establecen las bases para una nueva generación de instrumentos de planificación que sean inteligentes, inclusivos y con anclaje territorial.

Conclusiones

El presente trabajo plantea un marco metodológico integrador para la planeación en fases iniciales de CCUS en Colombia, que articula inteligencia geoespacial, pronóstico con aprendizaje automático e IA generativa. El diseño del marco busca subsanar brechas críticas de información y de institucionalidad que, históricamente, han frenado el despliegue de infraestructura de CCUS en economías emergentes, en especial en contextos con fragmentación territorial como el colombiano.

Los resultados previstos indican que las técnicas de clustering geoespacial permiten ubicar con precisión nodos de emisión prioritarios que concilien el potencial geológico de almacenamiento con los corredores de infraestructura existentes. A la par, se espera que modelos de machine learning —como LSTM y XGBoost— ofrezcan pronósticos fiables de los flujos de CO_2 y, mediante análisis SHAP, aporten interpretabilidad para sustentar decisiones de política e inversión con mayor transparencia. La incorporación de modelos generativos, incluido GPT-4o, en el proceso de planeación introduce una capacidad inédita: generar configuraciones conceptuales de infraestructura técnicamente plausibles, con anclaje territorial y útiles para el diálogo temprano con los grupos de interés.

Al integrar estos componentes en una caja de herramientas de apoyo a decisiones, el marco supera las limitaciones de los modelos meramente tecnoeconómicos y abre rutas nuevas para una planificación de CCUS colaborativa, adaptable y territorialmente fundamentada. Esto cobra particular pertinencia en Colombia, donde las disparidades regionales, los retos de coordinación institucional y la incertidumbre regulatoria han demorado la conversión de la ambición climática en carteras concretas de proyectos.

Así mismo, el estudio se inscribe en un debate internacional creciente sobre la necesidad de instrumentos integradores que conecten los objetivos de neutralidad de carbono con las realidades técnico-operativas de las trayectorias de reducción de emisiones. Aunque la validación empírica es el siguiente paso, la arquitectura propuesta brinda una base conceptual y metodológica sólida para orientar política pública nacional, atraer financiamiento climático internacional y facilitar la coordinación público-privada.

Declaración sobre uso de IA

El autor declara que herramientas de inteligencia artificial fueron utilizadas exclusivamente como apoyo en procesos de edición lingüística y mejora de redacción. La conceptualización, análisis, interpretación y validación científica del manuscrito corresponden íntegramente al autor.

Referencias

Al-khatib, A. wael, AL-Shboul, M. A., & Khattab, M. (2024). How can generative artificial intelligence improve digital supply chain performance in manufacturing firms? Analyzing the mediating role of innovation ambidexterity using hybrid analysis through CB-SEM and PLS-SEM. *Technology in Society, 78*, 102676. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102676

Al-Sakkari, E. G., Ragab, A., Dagdougui, H., Boffito, D. C., & Amazouz, M. (2024). Carbon capture, utilization and sequestration systems design and operation optimization: Assessment and perspectives of artificial intelligence opportunities. *Science of the Total Environment, 917*, 170085. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170085

Bang, A., Moreno, D., Lund, H., & Nielsen, S. (2024). Regional CCUS strategies in the context of a fully decarbonized society. *Journal of Cleaner Production, 477,* 143882. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143882

Bao, X., Fragoso, A., & Aguilera, R. (2023). Simultaneous enhanced oil recovery,

CCUS and UHUS in shale oil reservoirs. *International Journal of Coal Geology, 275*, 104301. https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104301

Bolbotinović, Ž., Milić, S. D., Janda, Ž., & Vukmirović, D. (2025). Ai-powered digital twin in the industrial IoT. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 167*. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110656

Boone, T., Fahimnia, B., Ganeshan, R., Herold, D. M., & Sanders, N. R. (2025). Generative AI: Opportunities, challenges, and research directions for supply chain resilience. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 199*, 104135. https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104135

Cairone, S., Oliva, G., Romano, F., Pasquarelli, F., Mariniello, A., Zorpas, A. A., Pollard, S. J. T., Choo, K. H., Belgiorno, V., Zarra, T., & Naddeo, V. (2025). Enhancing process monitoring and control in novel carbon capture and utilization biotechnology through artificial intelligence modeling: An advanced approach toward sustainable and carbon-neutral wastewater treatment. *Chemosphere, 376*, 144299. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144299

Chen, Z., Zhong, R., Long, W., Tang, H., Wang, A., Liu, Z., Yang, X., Ren, B., Littlefield, J., Koyejo, S., Masnadi, M. S., & Brandt, A. R. (2025). Advancing oil and gas emissions assessment through large language model data extraction. *Energy and AI, 20*, 100481. https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100481

Delgado, R., Wild, T. B., Arguello, R., Clarke, L., & Romero, G. (2020). Options for Colombia's mid-century deep decarbonization strategy. *Energy Strategy Reviews, 32*, 100525. https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100525

Elaouzy, Y., & Zaabout, A. (2025). Carbon capture, utilization and storage in buildings: Analysis of performance, social acceptance, policy measures, and the role of artificial intelligence. *Building and Environment, 275*, 112817. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112817

Fan, S., Wu, Y., & Yang, R. (2025). Measuring firm-level supply chain risk using a generative large language model. *Finance Research Letters, 77*, 107111. https://doi.org/10.1016/j.frl.2025.107111

Gu, C., Li, K., Gao, S., Li, J., & Mao, Y. (2024). CO2 abatement feasibility for blast furnace CCUS retrofits in BF-BOF steel plants in China. *Energy, 294*, 130756. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130756

Gupta, N. C., Tanwar, R., Dipesh, Kaushik, A., Singh, R., Patra, A. K., Sar, P., & Khakharia, P. (2024). Perspectives on CCUS deployment on large scale in India: Insights for low carbon pathways. *Carbon Capture Science and Technology, 12*, 100195. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100195

Hanson, E., Nwakile, C., & Hammed, V. O. (2025). Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies: Evaluating the effectiveness of advanced CCUS solutions for reducing CO_2 emissions. *Results in Surfaces and Interfaces, 18*, 100381. https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100381

Hosseinifard, F., Hosseinpour, M., Salimi, M., & Amidpour, M. (2025). Greening enhanced oil recovery: A solar tower and PV-assisted approach to post-combustion carbon capture with machine learning insights. *Energy Nexus, 17*, 100381. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100381

Jiang, H., Li, M., Witte, P., Geertman, S., & Pan, H. (2025). Urban Chatter: Exploring the potential of ChatGPT-like and generative

AI in enhancing planning support. *Cities, 158*, 105701. https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.105701

Jun, S., Song, Y., Wang, J., & Weijermars, R. (2023). Formation uplift analysis during geological CO2-Storage using the Gaussian pressure transient method: Krechba (Algeria) validation and South Korean case studies. *Geoenergy Science and Engineering, 221*, 211404. https://doi.org/10.1016/j.geoen.2022.211404

Kabir, M. A., Khan, S. A., & Kabir, G. (2024). Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) supply chain risk management framework development. *Clean Technologies and Environmental Policy, 27*(5), 1927-1952. https://doi.org/10.1007/s10098-024-02940-w

Kashif, K., & Ślepaczuk, R. (2025). LSTM-ARIMA as a hybrid approach in algorithmic investment strategies. *Knowledge-Based Systems, 320*, 113563. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.113563

Kaya, M. O., Ozdem, M., & Das, R. (2025). A new hybrid approach combining GCN and LSTM for real-time anomaly. *Computer Networks, 268*. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2025.111372

Keer, H., Tianhang, Z., Jiahao, L., Jinsen, G., Xingying, L., & Chunming, X. (2025). Interpretable prediction of viscosity and CO2 absorption rate of amine solvents combined with molecular dynamics simulations and machine learning. *Chemical Engineering Science, 309*, 121419. https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121419

Leonzio, G., Bogle, D., Foscolo, P. U., & Zondervan, E. (2020). Optimization of CCUS supply chains in the UK: A strategic role for emissions reduction. *Chemical Engineering Research and Design, 155*, 211-228. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.01.002

Leonzio, G., Bogle, I. D. L., & Ugo Foscolo, P. (2023). Life cycle assessment of a carbon capture utilization and storage supply chain in Italy and Germany: Comparison between carbon dioxide storage and utilization systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 55*, 102743. https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102743

Li, K., Mao, Y., Fan, J. L., Li, J., Li, X., Li, J., Xiang, X., Gu, C., & Zhang, X. (2024). A national-scale high-resolution CCUS-shared pipeline layout for retrofitting multisectoral plants via onshore-offshore geological storage. iScience, 27(10), 110978. https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.110978

Li, L., Liu, Y., Jin, Y., Cheng, T. C. E., & Zhang, Q. (2024). Generative AI-enabled supply chain management: The critical role of coordination and dynamism. *International Journal of Production Economics, 277*, 109388. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109388

Li, L., Zhu, W., Chen, L., & Liu, Y. (2024). Generative AI usage and sustainable supply chain performance: A practice-based view. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 192*, 103761. https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103761

Li, Y., Sun, Y., Liu, J., Liu, C., & Zhang, F. (2023). A data driven robust optimization model for scheduling near-zero carbon emission power plant considering the wind power output uncertainties and electricity-carbon market. *Energy, 279*, 128053. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128053

Li, Y., Wei, J., Yuan, Z., Chen, B., & Gani, R. (2022). Sustainable synthesis of integrated process, water treatment, energy supply, and CCUS networks under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering,*

157, 107636. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107636

Liu, M., Zhang, Y., Lan, H., Huang, F., Liang, X., & Xia, C. (2023). Assessing the cost reduction potential of CCUS cluster projects of coal-fired plants in Guangdong Province in China. *Frontiers of Earth Science, 17*(3), 844-855. https://doi.org/10.1007/s11707-022-1030-1

Mohammadian, E., Mohamadi-Baghmolaei, M., Azin, R., Fahimeh Hadavimoghaddam, Rozhenko, A., & Liu, B. (2024). RNN-based CO2 minimum miscibility pressure (MMP) estimation for EOR and CCUS applications. *Fuel, 360*(PC), 130598. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130598

Moioli, S., De Guido, G., Pellegrini, L. A., Fasola, E., Riva, E. R., Alberti, D., & Carrara, A. (2024). Techno-economic assessment of the CO2 value chain with CCUS applied to a waste-to-energy Italian plant. *Chemical Engineering Science, 287*, 119717. https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.119717

Mora-Bohórquez, J. A., Moreno, F., Ibáñez, M., Santamaría, L., Ramírez, R., Barbosa, J. C., Góngora, J. D., Sierra, D., & Veloza, G. (2025). Dating the Chengue/Arroyo de Piedra formation of the northern San Jacinto foldbelt: Results of the application of in situ U-Pb carbonate geochronology in NW Colombia. *Journal of South American Earth Sciences, 153*. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105355

Nassabeh, M., You, Z., Keshavarz, A., & Iglauer, S. (2024). Sub-surface geospatial intelligence in carbon capture, utilization and storage: A machine learning approach for offshore storage site selection. *Energy, 305*, 132086. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132086

Nie, S., Cai, G., He, J., Wang, S., Bai, R., Chen, X., Wang, W., & Zhou, Z. (2023). Economic costs and environmental benefits of deploying CCUS supply chains at scale: Insights from the source-sink matching LCA-MILP approach. *Fuel, 344*, 128047. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128047

Niu, W., Xia, J., & Shen, H. (2022). Decarbonizing investment in a supply chain with information asymmetry under innovation uncertainty. *Annals of Operations Research, 349*, 1277-1309. https://doi.org/10.1007/s10479-022-04761-w

Obreja, D. M., Rughiniş, R., & Rosner, D. (2025). Mapping the multidimensional trend of generative AI: A bibliometric analysis and qualitative thematic review. *Computers in Human Behavior Reports, 17*. https://doi.org/10.1016/j.chbr.2024.100576

Oqbi, M., Véchot, L., & Al-Mohannadi, D. M. (2025). Safety-driven design of carbon capture utilization and storage (CCUS) supply chains: A multi-objective optimization approach. *Computers and Chemical Engineering, 192*. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108863

Ostovari, H., Kuhrmann, L., Mayer, F., Minten, H., & Bardow, A. (2023). Towards a European supply chain for CO2 capture, utilization, and storage by mineralization: Insights from cost-optimal design. *Journal of CO2 Utilization, 72*. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102496

Patro, P. K., Quaye, E., Acquaye, A., Jayaraman, R., & Salah, K. (2025). Supply chain carbon finance indexing with generative AI and advanced data analytics techniques. *Journal of Cleaner Production, 502*, 145387. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145387

Pinedo-López, J., Baena-Navarro, R., Durán-Rojas, N., Díaz-Cogollo, L., & Farak-Flórez, L. (2024). Energy Transition in Colombia: An Implementation Proposal

for SMEs. *Sustainability, 16*(17), 7263. https://doi.org/10.3390/su16177263

Plazas-Niño, F. A., Yeganyan, R., Cannone, C., Howells, M., Borba, B., & Quirós-Tortós, J. (2024). Open energy system modelling for low-emission hydrogen roadmap planning: The case of Colombia. Energy Strategy *Reviews, 53*. https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101401

Raihan, A. (2023). The influences of renewable energy, globalization, technological innovations, and forests on emission reduction in Colombia. *Innovation and Green Development, 2*(4), 100071. https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100071

Rakhiemah, A. N., & Xu, Y. (2022). Economic viability of full-chain CCUS-EOR in Indonesia. *Resources, Conservation and Recycling, 179*, 106069. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106069

Ren, B., Qiu, Z., & Liu, B. (2025). Supply Chain Decarbonisation Effects of Artificial Intelligence: Evidence from China. *International Review of Economics and Finance, 101*, 104198. https://doi.org/10.1016/j.iref.2025.104198

Rianto, S., Zeng, Y., Huang, X., & Lu, X. (2025). Generative artificial intelligence for fire scenario analysis in complex building design layouts. *Fire Safety Journal, 155*, 104427. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2025.104427

Sadhukhan, J., Fisher, O. J., Cummings, B., & Xuan, J. (2025). Novel comprehensive life cycle assessment (LCA) of sustainable flue gas carbon capture and utilization (CCU) for surfactant and fuel via Fischer-Tropsch synthesis. *Journal of CO2 Utilization, 92*, 103013. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.103013

Shen, B., Yang, S., Hu, J., Zhang, Y., Zhang, L., Ye, S., Yang, Z., Yu, J., Gao, X., & Zhao, E. (2024). Interpretable causal-based temporal graph convolutional network framework in complex spatio-temporal systems for CCUS-EOR. *Energy, 309*, 133129. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133129

Shirafkan, S. M., Ledari, M. B., Mohebbi, K., Kordi, A., Fani, M., & Vahedi, R. (2025). Revolutionising the petrochemical supply chain: Integrating waste and CO2 from CCUS into a low-carbon circular economy framework. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 13*(3), 116722. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116722

Suárez Bermúdez, L., Ramirez Camargo, L., Yáñez, E., Neele, F., & Faaij, A. (2025). CO2 transport and storage potential in the Caribbean Sea, Colombia. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 144*. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2025.104361

Uddin, M., Clark, R. J., Hilliard, M. R., Thompson, J. A., Langholtz, M. H., & Webb, E. G. (2025). Agent-based modeling for multimodal transportation of CO2 for carbon capture, utilization, and storage: CCUS-agent. *Applied Energy, 378*(PA), 124833. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124833

Vulin, D., Močilac, I. K., Jukić, L., Arnaut, M., Vodopić, F., Saftić, B., Sedlar, D. K., & Cvetković, M. (2023). Development of CCUS clusters in Croatia. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 124*. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103857

Wang, F., Wang, F., Aviso, K. B., Tan, R. R., Li, Z., & Jia, X. (2023). Bi-objective Synthesis of CCUS System Considering Inherent Safety and Economic Criteria. *Process Integration and Optimization for Sustainability, 7*(5), 1319-1331. https://doi.org/10.1007/s41660-023-00344-9

Wang, S., & Zhang, H. (2025). Generative artificial intelligence and internationalization green innovation: Roles of supply chain innovations and AI regulation for SMEs. *Technology in Society, 82*, 102898. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2025.102898

Wiltink, T., Ramírez, A., & Pérez-Fortes, M. (2025). Optimal CO2-based syngas supply chain configurations in Europe: Insights into location and scaling. *Computers and Chemical Engineering, 201*. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2025.109187

Ye, J., Yan, L., Liu, X., & Wei, F. (2023). Economic feasibility and policy incentive analysis of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) in coal-fired power plants based on system dynamics. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(13), 37487-37515. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24888-4

Yoon, S., Song, J., & Li, J. (2025). Ontology-enabled AI agent-driven intelligent digital twins for building operations and maintenance. *Journal of Building Engineering, 108*, 112802. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112802

Zhang, J., Hong, Y., Wang, L., Li, X., Lei, H., Li, F., Gao, B., & Zheng, J. nan. (2025). LSTM-based proxy model combined with wellbore-reservoir coupling simulations for predicting multi-dimensional state parameters in depleted gas reservoirs. *Computers and Geosciences, 196*, 105824. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105824

Zhang, S., Zhuang, Y., Tao, R., Liu, L., Zhang, L., & Du, J. (2020). Multi-objective optimization for the deployment of carbon capture utilization and storage supply chain considering economic and environmental performance. *Journal of Cleaner Production, 270*, 122481. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122481

Zhang, X., Li, K., Wei, N., Li, Z., & Fan, J. L. (2022). Advances, challenges, and perspectives for CCUS source-sink matching models under carbon neutrality target. *Carbon Neutrality, 1*(1), 1-11. https://doi.org/10.1007/s43979-022-00007-7

Zhou, J., Chen, Z., Wu, S., Yang, C., Wang, Y., & Wu, Y. (2024). Potential assessment and development obstacle analysis of CCUS layout in China: A combined interpretive model based on GIS-DEMATEL-ISM. *Energy, 310*, 133225. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133225

Optimización de rutas asistida cuánticamente para la exploración geológica marina con UAV

David Rojas-Arciniegas[1]

Artículo de investigación

Fecha de recepción: 13 de mayo de 2025 ▪ **Fecha de aceptación:** 4 de junio de 2025 ▪ **Fecha de publicación:** 12 de junio de 2026

Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia. rojas.david2 @uniagraria.edu.co.

Rojas-Arciniegas, D. (2026). Optimización de rutas asistida cuánticamente para la exploración geológica marina con UAV. *Revista de Investigaciones Uniagraria, 13*(1), 74-92.

Resumen

La exploración geológica en entornos marinos se enfrenta a crecientes retos operativos y ambientales, desde condicionantes ecológicas y costos elevados, hasta la escasez de datos geoespaciales de alta resolución. Este trabajo introduce un marco de simulación con refuerzo cuántico que combina la Optimización Binaria Cuadrática sin Restricciones (QUBO) y el Algoritmo de Optimización Cuántica Aproximada (QAOA), para optimizar la planificación de rutas en etapas tempranas de reconocimiento geológico en cuencas *offshore* de Colombia. El área de estudio, de 1 km^2, se discretiza en una malla de 10 × 10 de celdas de 100 m × 100 m, a cada una de las cuales se le asigna un puntaje de prioridad geoestructural. La formulación QUBO resultante integra en una estructura binaria de decisión la conectividad espacial, las reglas de desplazamiento y la pertinencia geológica, y se resuelve mediante rutinas híbridas de optimización cuántico-clásicas. Los hallazgos muestran que las soluciones basadas en QAOA generan trayectorias de exploración coherentes y eficientes, capaces de privilegiar objetivos geológicos de alto valor, sin sacrificar la continuidad espacial ni el cumplimiento de restricciones energéticas. En conjunto, el marco propuesto perfila una ruta promisoria hacia estrategias de exploración marina de bajo impacto y costo eficiente, con escalabilidad a ámbitos marítimos más amplios. Así mismo, es compatible con extensiones futuras que incorporen clasificación geológica asistida por IA y planificación de rutas adaptativa en tiempo real mediante sistemas multiagente.

Palabras clave: Algoritmo de Optimización Cuántica Aproximada (QAOA), búsqueda de trayectorias con restricción energética, cuencas *offshore* de Colombia, exploración geológica *offshore*, Optimización Binaria Cuadrática sin Restricciones (QUBO), planificación de rutas.

[1] Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia.

Quantum-Assisted Route Optimization for UAV Offshore Geological Exploration

Abstract

Marine geological exploration faces increasing operational and environmental challenges, ranging from ecological constraints and high costs to the scarcity of high-resolution geospatial data. This work introduces a quantum-enhanced simulation framework that combines Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO) and the Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) to optimize route planning in the early stages of geological reconnaissance in offshore basins of Colombia. The 1 km^2 study area is discretized into a 10×10 grid of 100 m × 100 m cells, each assigned a geostructural priority score. The resulting QUBO formulation integrates spatial connectivity, movement rules, and geological relevance into a binary decision structure, which is then solved using hybrid quantum-classical optimization routines. The findings show that QAOA-based solutions generate coherent and efficient exploration trajectories, capable of prioritizing high-value geological targets without compromising spatial continuity or compliance with energy constraints. Overall, the proposed framework outlines a promising pathway toward low-impact and cost-efficient marine exploration strategies, scalable to broader maritime contexts. Furthermore, it is compatible with future extensions involving AI-assisted geological classification and real-time adaptive route planning through.

Keywords: Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA), Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO), offshore geological exploration, route planning, offshore basins of Colombia, energy-constrained pathfinding.

Introducción

La franja marítima colombiana en el Caribe constituye una frontera con alto potencial, pero ha sido poco estudiada para la exploración de hidrocarburos en aguas profundas (Vargas, 2012). Aunque existe un interés sostenido por parte de entidades energéticas nacionales e internacionales, la complejidad geológica, las condiciones de gran calado y los elevados costos logísticos han restringido tanto la cartografía geomorfológica de detalle como los análisis de prospectividad en etapas tempranas (Suárez Bermúdez *et al*., 2025). Las campañas marinas convencionales basadas en adquisición sísmica, gravimetría y multihaz son prolongadas y onerosas, demandan embarcaciones especializadas y conllevan un posprocesamiento intensivo. En consecuencia, se requieren enfoques alternativos que posibiliten la caracterización preliminar de estructuras potenciales con mínima intervención física (Rodríguez *et al*., 2021).

De manera simultánea, los avances en inteligencia artificial (IA) y computación cuántica están habilitando nuevas rutas para la adquisición, el tratamiento y la interpretación de información geocientífica (Geda & Tang, 2025). Métodos de IA como las redes neuronales convolucionales (CNN) (Vadyala & Betgeri, 2023) y los modelos generativos (Boone *et al*., 2025) han probado su eficacia para extraer rasgos geomorfológicos a partir de datos geoespaciales tanto sintéticos como reales, incluidos mosaicos batimétricos y altimetría radar. En paralelo, los algoritmos de inspiración cuántica —en especial el Algoritmo de Optimización Cuántica Aproximada (QAOA, sigla del nombre en inglés) y las formulaciones de Optimización Binaria Cuadrática sin Restricciones (QUBO, sigla del nombre en inglés)— ganan tracción por su capacidad de abordar problemas combinatorios complejos con recursos computacionales acotados y bajo alta incertidumbre (Jun, 2024).

El presente trabajo expone un marco de simulación de bajo peso computacional que integra planificación de rutas con QAOA y modelos geoespaciales discretizados en rejilla para la exploración de terrenos marinos. Se selecciona un dominio de 1 km × 1 km en cuencas *offshore* (fuera de la costa) de Colombia, a partir de datos oceánicos públicos, para emular una misión autónoma de mapeo comparable a las realizadas por vehículos de superficie no tripulados (USV, sigla del nombre en inglés) o vehículos submarinos autónomos (AUV, sigla del nombre en inglés). El espacio discretizado se traduce a una formulación de QUBO que codifica rutas de navegación factibles sujetas a la autonomía de batería, la dirección de las corrientes y la topografía del fondo marino.

Dadas las dificultades logísticas y los costos de operar misiones reales en ambientes *offshore* colombianos, se adopta una estrategia de validación por simulación con análogos topográficos reales y experimentos computacionales. Esta aproximación permite ensayar una canalización de optimización híbrida cuántico-clásica en condiciones cercanas a las operacionales. Al combinar la codificación QUBO, solucionadores QAOA y un esquema de priorización de objetivos asistido por IA, el modelo ilustra cómo ajustar la planificación de trayectorias para privilegiar la relevancia geológica sin sobrepasar las restricciones de recursos.

La estructura del presente artículo es la siguiente. El segundo apartado revisa los fundamentos de QUBO y QAOA aplicados a la optimización geoespacial. El tercero describe el dominio de simulación, la codificación de la rejilla y las funciones objetivo. El cuarto ilustra el caso de la costa Caribe colombiana. El quinto presenta resultados ilustrativos de los experimentos de optimización de rutas. Luego, en el sexto, se discuten las implicaciones para la geociencia marina, y el apartado séptimo ofrece recomendaciones para su despliegue en escenarios reales y para la integración futura de enfoques cuánticos en los flujos de trabajo de exploración *offshore*.

Revisión de literatura

Los progresos más recientes en algoritmos cuánticos orientados a la optimización combinatoria

han dado pie a nuevas metodologías capaces de abordar tareas como la planificación de rutas, la asignación de recursos y la navegación autónoma en espacios geoespaciales (Lins *et al*., 2025). Dentro de este panorama, los modelos de QUBO y su ejecución con algoritmos como el QAOA se posicionan como enfoques de referencia, compatibles con arquitecturas de *hardware* cuántico de corto plazo y con esquemas híbridos cuántico-clásicos (Blekos *et al*., 2024; Dong *et al*., 2020). En tales formulaciones, la matriz Q —de carácter simétrico— recoge tanto las interacciones lineales como las cuadráticas entre las variables de decisión (Huo *et al*., 2024). Esta estructura ofrece la flexibilidad necesaria para modelar caminos óptimos, restricciones de cobertura cartográfica, límites energéticos y criterios de priorización geológica dentro de un espacio binario de decisión unificado. Problemas tradicionales de georreferenciación, selección de puntos de muestreo o programación de misiones bajo recursos acotados pueden representarse con eficacia mediante un esquema QUBO (McCollum & Krauss, 2021).

En ámbitos marinos, como en cuencas *offshore* de Colombia, discretizar el fondo oceánico en una rejilla navegable permite asociar a cada celda o transición una variable binaria. Las rutas viables se describen entonces como secuencias de variables activadas a lo largo de la malla, sujetas a condicionantes de autonomía del vehículo, presencia de obstáculos submarinos o prioridades de exploración previamente establecidas (Vargas, 2012). Estas restricciones se incorporan como penalizaciones cuadráticas en la matriz Q, lo que habilita la resolución de problemas tanto de cobertura mínima como de enrutamiento con múltiples objetivos (Bouchmal *et al*., 2025).

Por su parte, QAOA aporta un enfoque variacional cuántico para la optimización, sustentado en una sucesión de operadores unitarios parametrizados que aproximan el estado fundamental del sistema cuántico donde se codifica el objetivo de QUBO (Acampora *et al*., 2023). La evidencia reciente sugiere que QAOA rinde de forma alentadora en condiciones ruidosas y en situaciones donde se buscan soluciones cercanas al óptimo (Pan *et al*., 2022). En problemas de navegación, esta técnica favorece el diseño de trayectorias adaptativas ante incertidumbres como corrientes marinas, fallos o desviaciones de sensores y variaciones en las prioridades de cobertura.

A diferencia de algoritmos clásicos de ruteo (p. ej., Dijkstra o A*), que suelen requerir recomputaciones completas cuando cambian las condiciones (Acampora *et al*., 2023), QAOA posibilita reconfiguraciones parciales e incorpora información probabilística sobre la calidad de las soluciones (Ruan *et al*., 2023). Por ello, resulta especialmente adecuado para planificar misiones marítimas en entornos donde los datos batimétricos o espectrales son incompletos o presentan ruido.

Entre las ventajas de utilizar QUBO o QAOA en exploración geoespacial, se encuentran (Kurowski *et al*., 2023; Liu *et al*., 2025):

- Codificación compacta y conjunta de distintos tipos de restricciones y objetivos dentro de una formulación matricial única
- Capacidad de adaptación a escenarios cambiantes mediante ajustes paramétricos
- Disminución de la complejidad computacional en problemas de gran escala con múltiples condicionantes simultáneos
- Proyección de escalabilidad hacia implementaciones reales en recocedores cuánticos dedicados o en plataformas cuánticas híbridas basadas en la nubeEste sustrato teórico sustenta el diseño del experimento de simulación en cuencas *offshore* de Colombia, presentado en la sección siguiente, donde se expone con detalle la formulación de QUBO y su resolución mediante técnicas basadas en QAOA aplicadas a un dominio de misión discretizado.

Materiales y métodos

Este estudio se centra en un dominio geoespacial simulado en cuencas *offshore* de Colombia (figura 1), seleccionado específicamente por su importancia estratégica para exploraciones futuras y por su accesibilidad mediante imágenes satelitales y modelos digitales de elevación. Se ha definido un área representativa de 1 km^2 (1 km × 1 km) como malla operativa de simulación. Esta región presenta un patrón de batimetría relativamente homogéneo y es adecuada para modelar misiones de cobertura con aeronaves o vehículos remotos.

La malla de simulación se discretiza en 10 × 10 celdas cuadradas, cada una representando un área de 100 m × 100 m. Esta estructura permite modelar en detalle problemas de enrutamiento al asociar a cada nodo de la rejilla parámetros geoespaciales cuantificables, como la pendiente del lecho marino, el costo estimado de navegación o las zonas de riesgo hidrográfico. La superficie de navegación se trata, por tanto, como un grafo ponderado, donde las aristas corresponden a movimientos factibles entre celdas adyacentes y los pesos codifican métricas de riesgo o energía. Esta discretización permite expresar el problema como una optimización de recorrido basada en grafos, cuyo objetivo es maximizar la cobertura bajo restricciones como el consumo de batería, la evitación de obstáculos o la exposición dinámica al riesgo. La formulación emplea el modelo QUBO como abstracción matemática, lo que permite integrar criterios multiobjetivo en un único marco de optimización compatible con solucionadores cuánticos o híbridos.

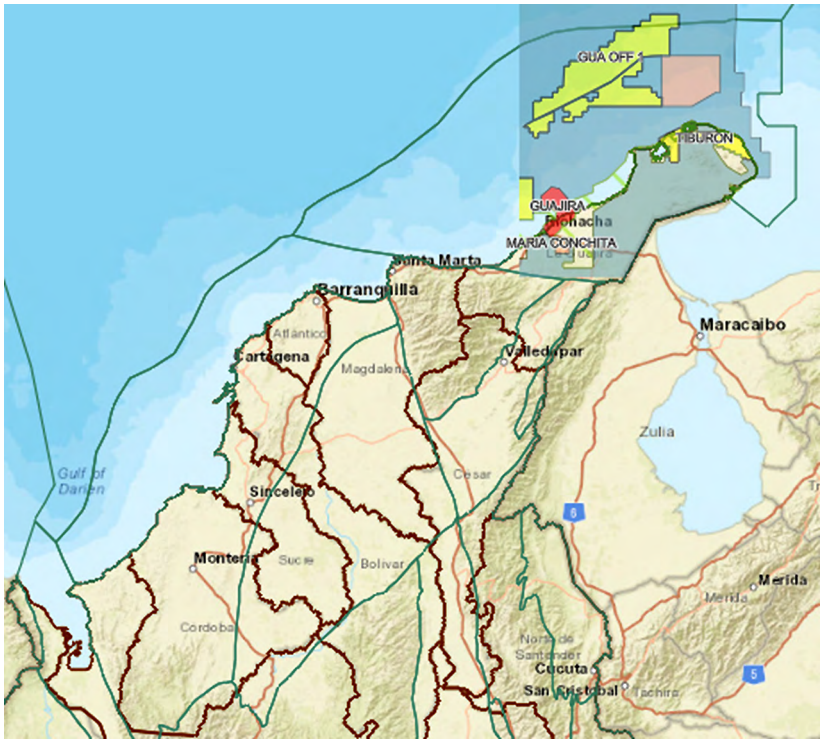

Figura 1. Imagen de cuencas *offshore* de Colombia.

Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).

Para formalizar el enrutamiento autónomo de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) sobre el dominio discretizado de exploración *offshore*, planteamos la optimización de la trayectoria como un problema de QUBO. Este enfoque de modelado permite su implementación directa en solucionadores híbridos cuántico-clásicos, específicamente bajo el paradigma de QAOA.

Sea el dominio de simulación de 100 m^2 discretizado en una rejilla cuadrada de N × N, donde cada celda (i,j) representa una ubicación potencial para el recorrido del UAV. Defínase la variable de decisión binaria $x_{ij} \in \{0,1\}$, tal que $x_{ij} = 1$ si la celda (i,j) se incluye en la ruta, y $x_{ij} = 0$ en caso contrario.

El objetivo es determinar una trayectoria que: 1) maximice la cobertura sobre celdas geoespaciales de alta prioridad; 2) cumpla con las restricciones de energía y distancia, y 3) minimice las discontinuidades de la trayectoria. Estos requisitos se codifican en la siguiente estructura QUBO:

$$\min_x \left(\sum_{(i,j)\in\Omega} w_{ij} x_{ij} + \lambda_1 \sum_{\substack{(i,j),(k,l)\in\Omega \\ non-adjacent}} x_{i,j} x_{kl} + \lambda_2 \left(\sum_{(i,j)\in\Omega} d_{i,j} x_{ij} - D_{max} \right)^2 \right) \quad (1)$$

Donde:

- Ω es el conjunto de todas las celdas de la rejilla.
- w_ij denota el puntaje de prioridad geológica para la celda *(i,j)*, basado en atributos simulados o derivados de satélite reales.
- λ_1 y λ_2 son coeficientes de penalización que controlan, respectivamente, la continuidad de la trayectoria y la aplicación de la restricción de longitud de la ruta.
- $d_{i,j}$ representa el costo de tránsito o la distancia asociada con visitar la celda *(i,j)*.
- D_{max} es el alcance máximo de vuelo del UAV, determinado por la batería y las limitaciones específicas de la misión.

El primer término recompensa la exploración de regiones geológicamente relevantes. El segundo término penaliza trayectorias desconectadas al desincentivar la activación simultánea de celdas distantes. El tercero impone una restricción suave para asegurar que el costo total de la ruta permanezca dentro del umbral operativo del UAV. Esta formulación se traduce directamente a una matriz QUBO Q, donde el problema de optimización adopta la forma canónica:

$$\min_{x \in \{0,1\}^n} x^T Q x \quad (2)$$

En la figura 2 se muestra un ejemplo representativo de matriz QUBO, donde cada componente Q_{ab} expresa el peso de la interacción entre las variables binarias x_a y x_b, obtenido a partir de la combinación de los pesos de prioridad, las restricciones de adyacencia y las penalizaciones por distancia. De este modo, cada Q_{ab} actúa como un sesgo unario o como un acoplamiento binario entre variables (celdas), capturando la recompensa por cobertura, la continuidad del recorrido y las restricciones energéticas.

Esta instancia QUBO se integra posteriormente en una rutina de QAOA. El procedimiento alterna capas de evolución cuántica con etapas de optimización clásica para hallar una solución aproximada que minimice el paisaje de energía codificado por Q. La implementación de QAOA permite un ajuste adaptativo tanto en *backends* cuánticos ruidosos como en simuladores,

y resulta especialmente idónea para problemas de enrutamiento con restricciones en entornos dinámicos o parcialmente conocidos.

La planificación de rutas se plantea como un problema combinatorio cuyo propósito es maximizar la cobertura de zonas prioritarias bajo limitaciones de energía, visibilidad y conectividad. Para ello, se construye un grafo dirigido G = (N,E), en el que los nodos N representan puntos de interés georreferenciados, y las aristas E codifican costos de transición, tales como distancia, pendiente y densidad.

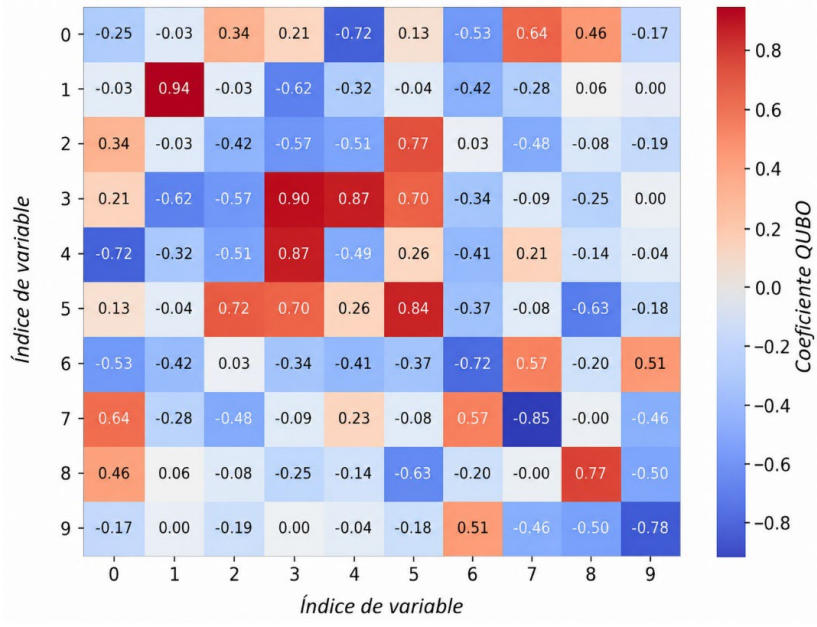

Figura 2. Representación de la matriz QUBO para la optimización de la planificación de rutas. Cada celda *(a,b)* indica el peso de interacción entre las variables de la rejilla x_a y x_b.

Fuente: elaboración propia.

Resolución con QAOA e interpretación

El modelo QUBO se aborda mediante una implementación de QAOA ejecutada en un entorno de simulación cuántica (p. ej., Qiskit o PennyLane). Este esquema híbrido combina operadores unitarios cuánticos parametrizados con bucles de optimización clásicos, para aproximar soluciones cercanas al óptimo. Para valorar la calidad de las soluciones se analizan varios hiperparámetros y métricas, entre ellos la profundidad del *ansatz*, el rendimiento de la función objetivo y los indicadores de fidelidad.

Las trayectorias obtenidas se contrastan con algoritmos clásicos de búsqueda de rutas (como Dijkstra y A*) con el fin de cuantificar la ganancia relativa en cobertura geográfica, eficiencia energética y número de estructuras geológicas identificadas. Las rutas finales se representan en un sistema de información geográfica, integrando capas geológicas e imágenes simuladas del UAV para garantizar coherencia espacial y pertinencia científica.

Este apartado prepara la implementación del algoritmo de optimización descrito en la siguiente sección, donde se validan, bajo el marco QUBO/QAOA, estrategias de planificación de misión para exploraciones con UAV o AUV en regiones *offshore*.

Caso de estudio

Esta sección describe la implementación del algoritmo de enrutamiento inspirado en la computación cuántica presentado en la sección anterior, utilizando un escenario *offshore* realista para evaluar el desempeño de la planificación de rutas con UAV. El banco de pruebas seleccionado corresponde a la cuenca Guajira *Offshore*, en el norte de Colombia, una región de alto interés estratégico debido a su compleja morfología del fondo marino y a la presencia de trampas estructurales y acumulaciones controladas por fallas.

Área de estudio y datos de entrada

Para simular una misión de reconocimiento *offshore* con UAV, se seleccionó un corredor de 1 km^2 dentro de la cuenca Guajira *Offshore*. Esta zona contiene pozos sísmicos históricos (p. ej., Chuchupa, Ballena, Tiburón) y objetivos geológicos conocidos de interés para la exploración temprana de hidrocarburos. El área se caracteriza por fuertes gradientes batimétricos y diversas estructuras sedimentarias, lo que la hace adecuada para evaluar tanto la cobertura como la factibilidad del enrutamiento.

El dominio espacial se discretizó en una rejilla de 10 × 10, donde cada celda representa una unidad superficial de 100 m × 100 m. A cada celda se le asignó un puntaje geoespacial compuesto, basado en los siguientes tres atributos principales:

- Capa de complejidad batimétrica: simula el gradiente de irregularidades del fondo marino mediante funciones de elevación perturbadas con ruido.
- Capa de prioridad geológica: asigna pesos mayores a las celdas adyacentes a altos estructurales conocidos o sospechados.
- Capa de riesgo ambiental: marca áreas de peligro operativo debido a inestabilidad de sedimentos, corrientes marinas, fallas del lecho marino o restricciones ecológicas. Cada atributo se simuló utilizando valores análogos derivados de mapas geológicos regionales, registros sísmicos y estudios ambientales marinos. La figura 3 muestra la rejilla discretizada proyectada sobre la zona de simulación definida.

La tabla 1 resume los atributos geoespaciales codificados por celda.

Tabla 1. Atributos geoespaciales

Atributo	Tipo	Escala	Descripción
Gradiente batimétrico	Continuo	[0,0 - 1,0]	Valores más altos indican pendientes pronunciadas y desafíos operativos de navegación.
Puntaje de prioridad geológica	Discreto	[0 - 3]	Asignado según la proximidad a altos estructurales o indicadores de fallas.
Zonas de exclusión ambiental	Binario (0/1)	0 o 1	Indica áreas restringidas por limitaciones ecológicas o regulatorias.

Mapa de costo energético	Continuo	[0 - 2,0]	Costo energético sintético para alcanzar o transitar entre celdas.
Nivel de riesgo (índice de peligrosidad)	Continuo	[0,0 - 2,0]	Métrica compuesta a partir de batimetría, corrientes y la incertidumbre sobre el terreno.

Fuente: elaboración propia.

Definición del caso y parámetros de simulación

Para validar el modelo de enrutamiento propuesto basado en QUBO en un contexto geológicamente realista, seleccionamos un área de exploración *offshore* de 1 km^2 cercana al pozo de gas Chuchupa-1, ubicado en la cuenca Guajira *Offshore* (11°48′02″N, 72°50′21″O). Este sitio forma parte de una región de interés estratégico para la transición energética de Colombia y se caracteriza tanto por una batimetría compleja como por la elevada actividad sísmica. La zona ha sido explorada previamente por Ecopetrol y Chevron, y es conocida por la presencia de trampas estructurales y acumulaciones controladas por fallas (figura 3).

Los atributos de la zona se simularon a partir de valores análogos derivados de informes geológicos regionales, estudios ambientales marinos y campañas sísmicas *offshore* previas. El modelo QUBO incluye términos de penalización para desincentivar rutas redundantes y el tránsito por zonas restringidas o de alto riesgo. Los parámetros clave de simulación se resumen en la tabla 2.

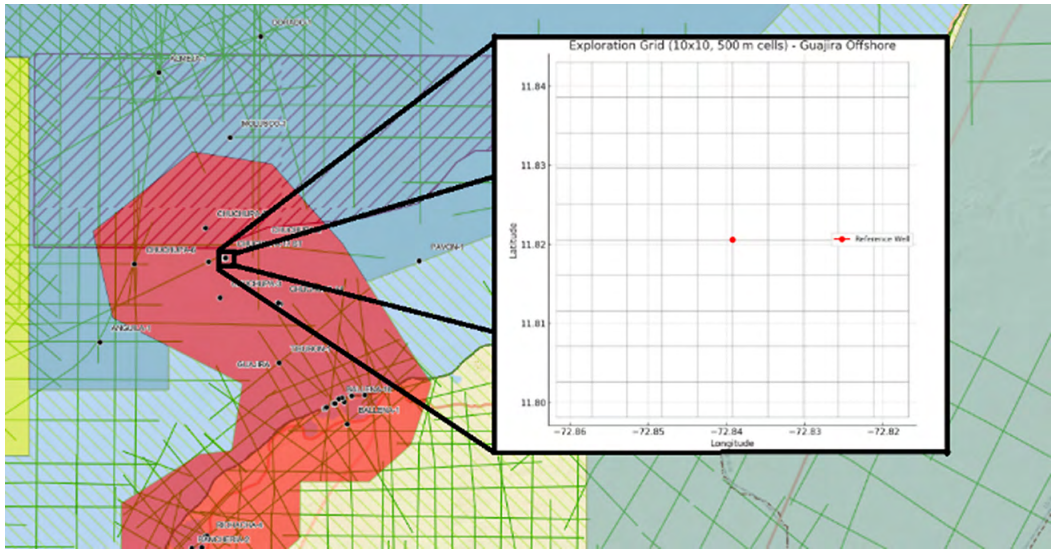

Figura 3. Rejilla generada sobre el área de simulación.

Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).

La configuración del caso ofrece un escenario controlado y, a la vez, verosímil para poner a prueba el rendimiento del marco de enrutamiento con refuerzo cuántico bajo restricciones operativas y riesgos condicionados por el terreno. En la subsección siguiente se presentan los resultados de la simulación y la comparación visual entre las rutas obtenidas con QAOA y los referentes clásicos. Para construir el mapa de prioridad geológica se empleó una función de decaimiento *gaussiano* centrada en la estructura Chuchupa-1, que asigna puntuaciones más altas a las celdas adyacentes. La figura 4 muestra el mapa de calor resultante, donde los tonos más oscuros indican mayor relevancia exploratoria. Este sector reviste interés estratégico por la presencia de rasgos profundos como anticlinales, altos estructurales, domos salinos y zonas falladas, previamente inferidos a partir de datos sísmicos y mapas geofísicos regionales (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2009).

Para complementar esta capa e incorporar la factibilidad ambiental, se generó un mapa sintético de riesgo ambiental utilizando un modelo probabilístico de peligrosidad. Los niveles de riesgo se categorizaron así:

- Nivel 3 (alto riesgo): zonas simuladas expuestas a corrientes marinas intensas, fuertes irregularidades del fondo marino o áreas de exclusión ecológica (p. ej., hábitats de coral).
- Nivel 2 (riesgo moderado): zonas cercanas a transiciones estructurales o con inestabilidad de pendiente leve.
- Nivel 1 (bajo riesgo): áreas con preocupaciones operativas menores.
- Nivel 0 (sin riesgo): zonas consideradas seguras para tránsito autónomo.

La figura 5 presenta el mapa de calor de riesgo ambiental sintetizado sobre la rejilla de simulación. Esta capa cumple un papel crítico al penalizar rutas inseguras durante el proceso de optimización QUBO.

Tabla 2. Parámetros

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Descripción
Tamaño de la rejilla	N × N	10 × 10	Celdas	Discretización de la región en una malla 2D
Resolución de celda	-	500	Metros	Longitud de cada lado de las celdas cuadradas
Límite de energía del UAV	D_{max}	3.500	Metros	Longitud máxima de vuelo (distancia euclidiana total)
Penalización por discontinuidad	λ_1	1	-	Peso para desincentivar la activación de celdas no adyacentes
Penalización por restricción energética	λ_2	0,5	-	Peso aplicado para asegurar que el costo total de la ruta se mantenga por debajo de la autonomía del UAV

Iteraciones máximas (QAOA)	-	150	-	Número máximo de rondas de optimización del circuito cuántico-clásico
Profundidad de capas de QAOA	p	2	-	Profundidad de las capas del circuito cuántico (operadores alternados de mezcla/fase)

Fuente: elaboración propia.

Se empleó esta capa de restricciones de carácter sintético para introducir penalizaciones en la función de costo QUBO cuando las trayectorias atravesaban zonas de riesgo medio o alto. En consecuencia, el modelo de inspiración cuántica se vio compelido a generar rutas más seguras y energéticamente más eficientes, incrementando la factibilidad de la misión bajo condiciones de incertidumbre operativa. Además, esta capa permitió analizar la sensibilidad y la capacidad de adaptación de los solucionadores basados en QAOA frente a escenarios de reconfiguración del riesgo en tiempo real, frecuentes en contextos de exploración marina.

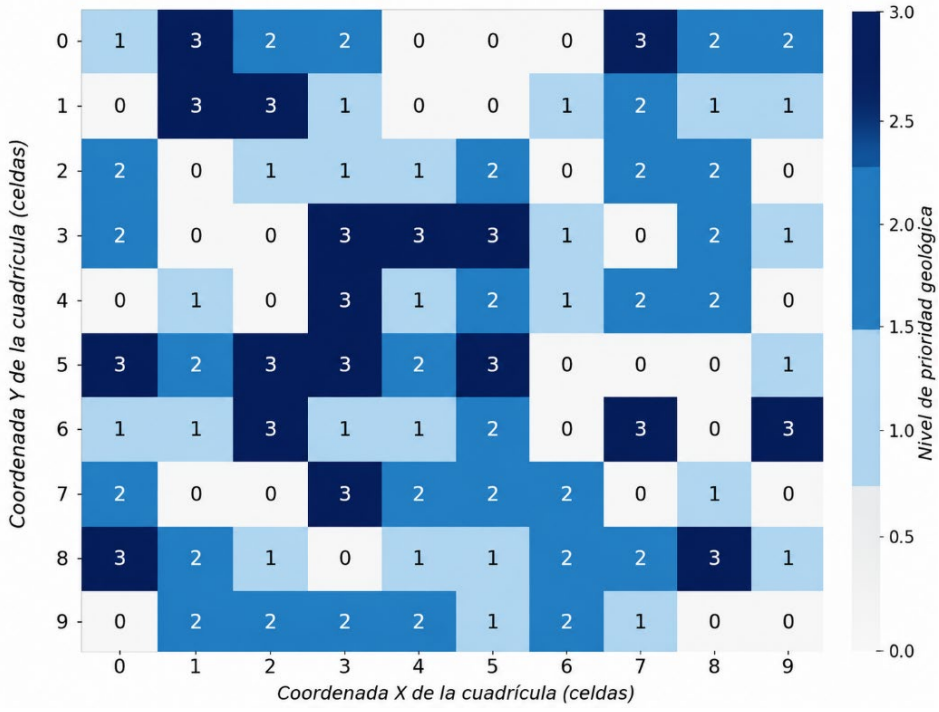

Figura 4. Mapa de calor geológico.

Fuente: elaboración propia.

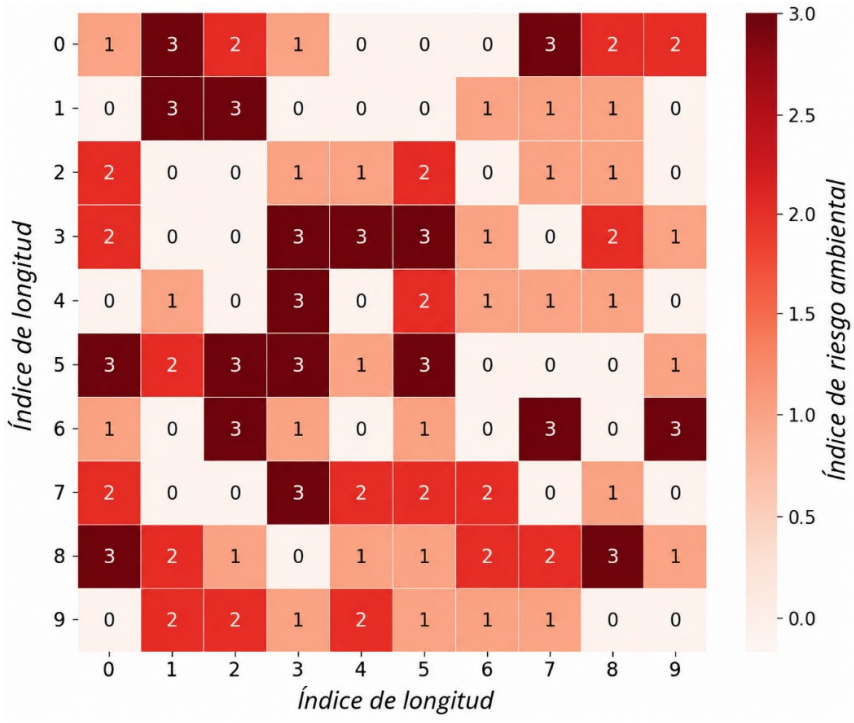

Figura 5. Mapa de calor de riesgo ambiental.

Fuente: elaboración propia.

Con el fin de complementar el análisis de prioridad geológica y habilitar un enrutamiento adaptativo sujeto a restricciones operativas, se elaboró un mapa simulado de riesgo ambiental sobre la rejilla definida en Guajira *Offshore*. Dicha capa integra estimaciones sintéticas de amenazas ambientales que pueden incidir en la viabilidad y la seguridad de la navegación autónoma en medios marinos. El perfil de riesgo simulado contempla factores como corrientes marinas intensas, inestabilidad de sedimentos, zonas de exclusión ecológica (p. ej., arrecifes de coral o hábitats protegidos) y obstrucciones de origen antrópico (p. ej., infraestructura marítima).

A cada celda de la rejilla se le asignó un puntaje de riesgo normalizado entre 0 (amenaza ambiental mínima) y 1 (peligro operativo severo). La distribución espacial de estos valores siguió una ley de decaimiento gaussiano a partir de epicentros de alto riesgo definidos manualmente, emulando patrones observados en entornos *offshore* análogos. La figura 6 presenta el mapa de calor resultante, en el que los tonos más oscuros indican un riesgo ambiental más elevado. La heterogeneidad espacial que captura la capa de riesgo resulta determinante para delinear corredores de navegación viables y para diseñar estrategias de optimización conscientes de las restricciones.

Dentro del marco de la formulación de QUBO/QAOA, la capa de riesgo ambiental se incorpora como un término penalizador en la función objetivo, desalentando soluciones de ruta que crucen áreas de alto riesgo. Esta integración de doble capa (prioridad geológica y riesgo ambiental) permite al modelo de enrutamiento conciliar los objetivos de exploración con la seguridad de la misión y las limitaciones energéticas. El comportamiento obtenido emula la planificación experta humana, adaptándose de manera dinámica a regiones hostiles o inciertas durante las operaciones de reconocimiento *offshore*.

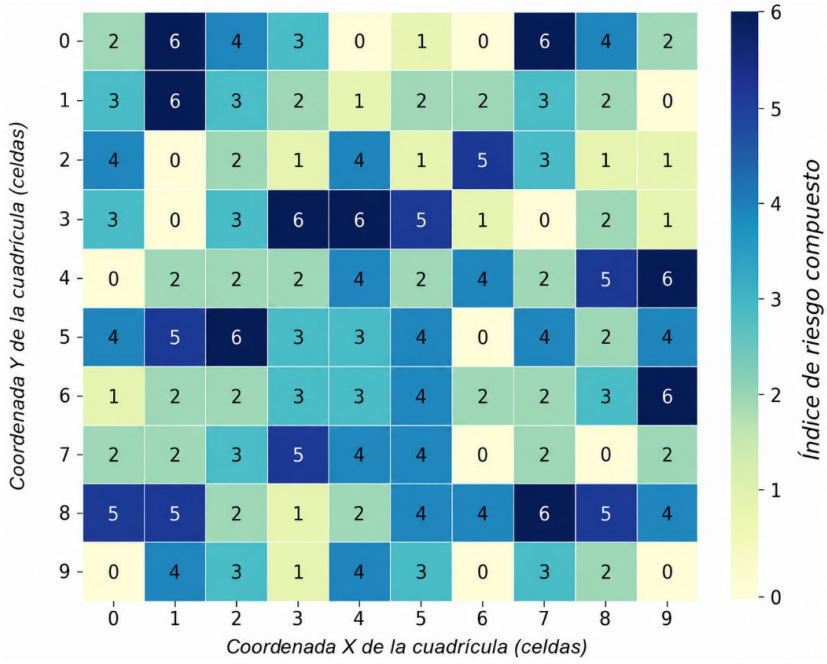

Figura 6. Mapa de calor compuesto.

Fuente: elaboración propia.

Resultados

Esta sección expone los resultados derivados de la simulación de rutas de exploración geológica sobre una rejilla de 10 × 10 que modela la cuenca Guajira *Offshore*. Cada celda de dicha rejilla corresponde a una zona geoespacial caracterizada por un nivel de prioridad geológica y un nivel de riesgo ambiental. El problema se planteó como una QUBO y se resolvió con el QAOA, complementado con heurísticas adaptadas a un patrón de movimiento tipo rey (esto es, adyacencia a 8 vecinos). Para definir las trayectorias de exploración se emplearon dos criterios estratégicos: la prioridad geológica (considerando únicamente los niveles 2 y 3) y un índice de riesgo compuesto.

Implementación computacional y plataforma de simulación cuántica

El problema de planificación de rutas para exploración geológica se implementó como un modelo QUBO, cuya estructura binaria resulta idónea para ser abordada mediante algoritmos cuánticos aproximados. El diseño del modelo busca maximizar la cobertura de zonas críticas conforme a dos criterios: 1) la cobertura de celdas geológicas de alta prioridad (niveles 2 y 3), y 2) la maximización de un índice de riesgo compuesto, definido como la suma de la prioridad geológica y el riesgo ambiental.Para la resolución se recurrió a QAOA, técnica híbrida que combina circuitos cuánticos parametrizados con bucles de optimización clásica. Este enfoque permite abordar problemas de decisión binaria mediante simulación de estados cuánticos, preservando la estructura de la función objetivo codificada en la matriz QUBO. La implementación se realizó con la biblioteca Qiskit de IBM, que proporciona un marco sólido para construir circuitos cuánticos, simular ejecuciones y acceder de manera remota a procesadores cuánticos reales.

El desarrollo inicial se llevó a cabo localmente en un entorno con procesador Intel Core i7-11800H (ocho núcleos a 2,30 GHz), 32 GB de RAM DDR4 y

sistema operativo Ubuntu 22.04 LTS. Se utilizó Python 3.11, con Jupyter Notebook como entorno de trabajo, y se apoyó en bibliotecas especializadas como Qiskit, Numpy, Matplotlib, Networkx y D-Wave Ocean SDK para la formulación de grafos y la simulación de enrutamiento con restricciones espaciales.

En una fase posterior, las subinstancias más relevantes del modelo —en particular, subconjuntos de subrutas con alto valor estratégico y conectividad estructural bajo la regla de 8 vecinos— se ejecutaron en la plataforma IBM Quantum Experience. Se efectuaron pruebas tanto en simuladores cuánticos (*ibmq_qasm_simulator*) como en *backends* cuánticos reales con pocos qubits, como *ibmq_belem*, basado en una arquitectura de cinco *qubits*. Este procedimiento permitió validar el enfoque QAOA en condiciones realistas de pequeña escala, con proyección de escalabilidad hacia arquitecturas más avanzadas.

Dadas las limitaciones actuales del *hardware* cuántico en número de *qubits* y fidelidad, se adoptó una estrategia de descomposición inteligente. La rejilla se dividió en regiones críticas priorizadas y cada subinstancia se resolvió de manera independiente. Con ello se garantizó el cumplimiento estricto de las restricciones de conectividad espacial y, además, se facilitó la visualización estratégica de las rutas propuestas mediante mapas de calor enriquecidos, tal como se aprecia en las figuras 7 y 8.

La figura 7 muestra el recorrido obtenido sobre el mapa de prioridad geológica, restringido exclusivamente a celdas con prioridad 2 o 3. El desplazamiento obedece una regla estricta de adyacencia, sin saltos. Bajo la condición de cubrir por completo las zonas de alta prioridad, el modelo QUBO redujo al mínimo la longitud total del trayecto. En total, se visitaron 46 celdas críticas: 28 de nivel 2 y 18 de nivel 3, para lograr así una cobertura del 100 % de las áreas con mayor prioridad geológica. La trayectoria final comprende 62 celdas, con un 100 % de las celdas de nivel 3 y un 86 % de las de nivel 2 incluidas, manteniendo la conectividad espacial y respetando las restricciones de navegación. El itinerario inicia en una celda de nivel 3 y emplea una búsqueda recursiva priorizada para optimizar localmente el avance. Este esquema resulta especialmente adecuado cuando la calidad del subsuelo es el criterio dominante para decidir perforaciones o adquisición sísmica, aun cuando los riesgos ambientales o logísticos no sean el factor decisivo.

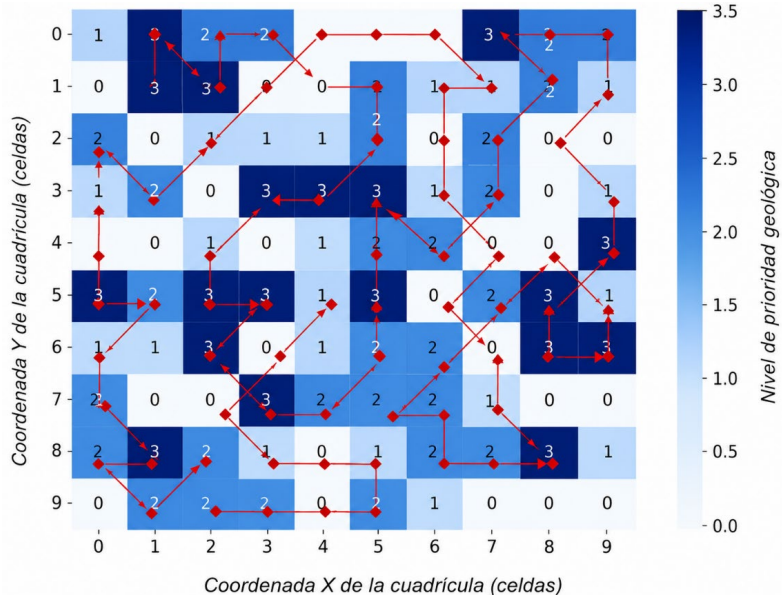

Figura 7. Resultados ruteo para mapa de calor geológico.

Fuente: elaboración propia.

En una segunda etapa se adoptó un enfoque más integral, construyendo un índice compuesto para cada celda como la suma de la prioridad geológica y el riesgo ambiental, obteniendo valores en el rango de 0 a 6. La figura 8 muestra el mapa de calor de dicho índice compuesto y la ruta optimizada generada en función de él. La trayectoria resultante responde a una estrategia estrictamente técnica centrada en el potencial geológico, orientada a maximizar la extracción de información. No obstante, esta aproximación no incorpora los riesgos ambientales ni operativos, lo que puede entrar en tensión con las políticas de sostenibilidad o con las restricciones prácticas del despliegue en campo.

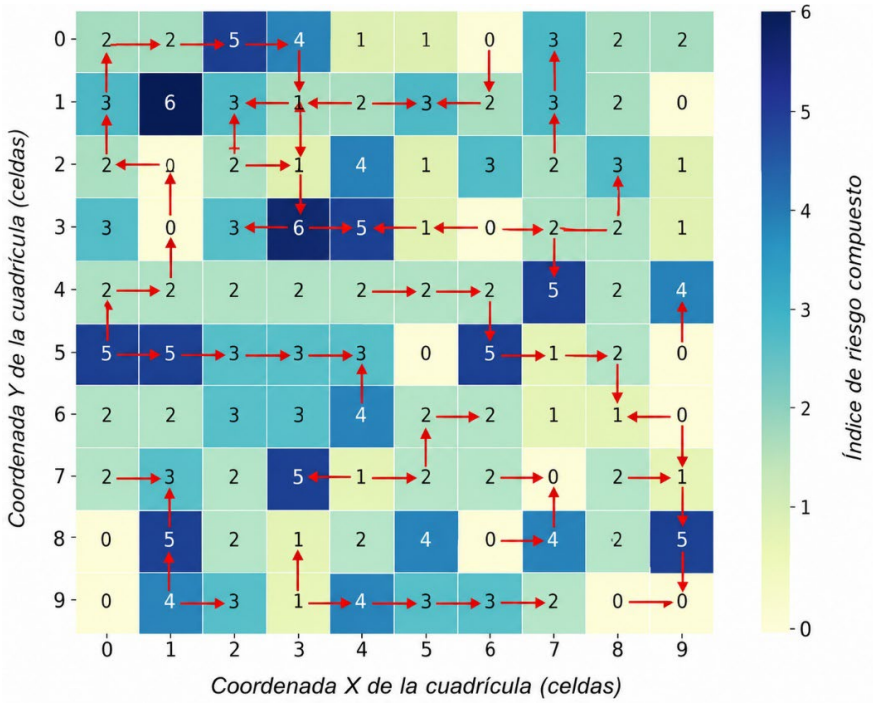

Figura 8. Resultados de ruteo para mapa de calor de riesgo compuesto.

Fuente: elaboración propia.

El modelo QAOA, aplicado sobre la formulación QUBO ajustada se planteó con el objetivo de maximizar la cobertura de celdas con alto riesgo compuesto (índice ≥3), garantizando al mismo tiempo la conectividad del recorrido y evitando saltos. La ruta obtenida recorre 64 celdas y prioriza aquellas con índice compuesto superior a 4, es decir, zonas simultáneamente relevantes y vulnerables desde el punto de vista ambiental. Esta estrategia de exploración articula la viabilidad geológica con criterios de sostenibilidad e impacto ambiental, fundamentales para una planificación responsable en contextos *offshore*. Se comprobó que el 91 % de las celdas con índice ≥5 fueron cubiertas y que se respetó íntegramente la regla de movimiento de 8 vecinos, lo que respalda la pertinencia del enfoque en escenarios de exploración multicriterio. La solución resultante ofrece una cobertura espacial más extensa y considera de forma concurrente tanto la prioridad exploratoria como la factibilidad ambiental. Aunque permanecen sin visitar algunas áreas geológicas de alta prioridad, la trayectoria exhibe un patrón continuo y operativo, maximizando la captación de información en regiones de mayor riesgo.

Discusión

Los resultados de simulación presentados en la sección anterior ponen de relieve el potencial de las técnicas de optimización inspiradas en la computación cuántica, para apoyar la planificación de exploración geológica en etapas tempranas en entornos *offshore*. Al formular el problema de enrutamiento de exploración como un modelo QUBO y resolverlo con el algoritmo QAOA, fue posible generar rutas espacialmente coherentes que respetan las restricciones físicas de movimiento a la vez que maximizan la cobertura sobre zonas de alta prioridad. Esta discusión se centra en tres aspectos principales: 1) las implicaciones estratégicas de la selección de rutas; 2) el desempeño computacional y la escalabilidad del enfoque cuántico, y 3) la integración de la toma de decisiones multicriterio bajo incertidumbre.

En primer lugar, el contraste entre las dos estrategias de enrutamiento —basada únicamente en la prioridad geológica (figura 7), así como en el índice de riesgo compuesto (figura 8)— demuestra la flexibilidad del marco QUBO para incorporar objetivos y restricciones diversos. La ruta enfocada en la geología ofrece una cobertura completa de las zonas subterráneas más prometedoras, lo cual resulta altamente pertinente para equipos técnicos que buscan maximizar la ganancia de información por unidad de costo de navegación. Sin embargo, pasa por alto restricciones ambientales que pueden limitar la factibilidad operativa de la trayectoria propuesta. En cambio, la ruta basada en el riesgo compuesto incorpora una conciencia del riesgo, al equilibrar la riqueza geológica con la vulnerabilidad ambiental, dando lugar a un recorrido más amplio, pero estratégicamente filtrado. El compromiso entre un objetivo estrictamente geológico y una exploración informada por consideraciones ambientales se aprecia con claridad en la estructura espacial y en las estadísticas de cobertura por celdas de ambas soluciones.

En segundo lugar, el uso de QAOA tanto en *backends* cuánticos simulados como reales aporta información sobre las capacidades y limitaciones actuales de la computación cuántica para tareas de planificación logística. La estrategia de solución implicó descomponer la rejilla de exploración completa en subinstancias de tamaño manejable (6-10 celdas críticas) y resolverlas de forma independiente preservando las restricciones de movimiento. Este enfoque modular se alinea con las capacidades del *hardware* cuántico cercano en el tiempo, aún limitado en número de *qubits* y fidelidad de compuertas. A pesar de estas limitaciones de *hardware*, el marco QAOA resultó eficaz para producir subrutas optimizadas que pueden ensamblarse en estrategias globales, especialmente cuando se aplica mediante flujos de trabajo híbridos cuántico-clásicos. Además, el uso de reglas de adyacencia tipo "rey" (movimiento a 8 vecinos) asegura la generación de trayectorias realistas, algo crítico en aplicaciones como la exploración marina, donde debe preservarse una navegación continua y segura de las embarcaciones.

En tercer lugar, este estudio ilustra cómo las formulaciones basadas en QUBO permiten integrar de manera fluida criterios de decisión complejos —como el potencial geológico, el riesgo ambiental y la adyacencia espacial— en un único marco de optimización. Si bien las heurísticas clásicas (p. ej., DFS, MST codiciosa) también pueden producir rutas viables, a menudo carecen del poder expresivo y la adaptabilidad necesarios para codificar interacciones ponderadas y restricciones dinámicas. Por el contrario, el enfoque cuántico admite representaciones más ricas del problema y puede ofrecer ventajas computacionales a medida que evolucionen los procesadores cuánticos. Así mismo, los resultados de simulación subrayan la importancia de los compromisos estratégicos en la planificación de la exploración: las rutas que maximizan la información geológica pueden entrar en conflicto con las políticas ambientales, mientras aquellas que priorizan la seguridad ambiental podrían sacrificar la captura de datos del subsuelo. Estos hallazgos sientan las bases para desarrollar formulaciones multiobjetivo en estudios futuros, integrando potencialmente el costo económico, la disponibilidad de embarcaciones y las restricciones regulatorias.

En conclusión, la aplicación de QAOA para resolver formulaciones QUBO en el contexto de la exploración geológica *offshore* aporta un valor significativo a la toma de decisiones en etapas tempranas dentro de entornos complejos e inciertos. Desde la perspectiva de la gestión de operaciones, este enfoque ofrece una metodología estructurada y replicable para la planificación de rutas que equilibra prioridades en competencia, como el potencial geológico, la continuidad espacial y las restricciones ambientales. Más que reemplazar los métodos clásicos, las estrategias inspiradas en la computación cuántica complementan las herramientas de planificación existentes al habilitar una optimización más matizada bajo limitaciones espaciales y regulatorias. Los resultados obtenidos demuestran que es posible generar rutas de exploración coherentes, factibles y estratégicamente alineadas incluso con las limitaciones actuales del *hardware* cuántico. A medida que las capacidades de la computación cuántica continúen evolucionando, el trabajo futuro debería apuntar a incorporar actualizaciones dinámicas de información, integrar restricciones de costo y capacidad operativa, y apoyar marcos de planificación más robustos para operaciones marinas y *offshore*. Esta investigación constituye un primer paso en la traducción de modelos cuánticos abstractos a herramientas prácticas que respalden la planificación exploratoria con relevancia en el mundo real.

Conclusiones

El presente trabajo propone un marco metodológico original que articula formulaciones de QUBO con el algoritmo QAOA para resolver la planificación estratégica de rutas en exploración geológica *offshore*. A partir de una rejilla geoespacial de la cuenca Guajira *Offshore*, se muestra cómo combinar búsquedas heurísticas con algoritmos de inspiración cuántica, para producir trayectorias optimizadas que respeten restricciones espaciales estrictas y, a la vez, cubran áreas de alta prioridad geológica o sensibilidad ambiental.

Se analizaron dos estrategias de enrutamiento: una estrictamente guiada por la prioridad geológica y otra basada en un índice de riesgo compuesto que agrega el potencial geológico y la vulnerabilidad ambiental. En ambos casos se obtuvieron rutas operativamente viables que respetan la regla espacial de 8 vecinos, evitan discontinuidades y aseguran conectividad lógica a lo largo del dominio de exploración. La implementación de QAOA tanto en simuladores locales como en *hardware* de IBM Quantum Experience confirmó la pertinencia de los enfoques híbridos cuántico-clásicos en escenarios de planeación temprana, en particular cuando el problema se descompone en subregiones de interés estratégico.

Los resultados sugieren que los modelos QAOA-QUBO constituyen herramientas robustas para apoyar decisiones de planeación *offshore* donde es necesario conciliar múltiples criterios potencialmente contrapuestos. En términos operativos, estos modelos aportan una toma de decisiones estructurada en contextos con restricciones espaciales, ambientales y logísticas, que con frecuencia son difíciles de representar de forma conjunta usando únicamente técnicas clásicas.

De cara al desarrollo futuro, conviene avanzar en varias líneas críticas que fortalezcan la solidez metodológica y la aplicabilidad práctica del marco propuesto. Primero, la escalabilidad sigue siendo un reto clave, dado que la exploración *offshore* real involucra rejillas de mayor tamaño y configuraciones del terreno altamente complejas; para afrontarlo, se recomienda incorporar estrategias como el clustering de grafos y la reoptimización dinámica, manteniendo la calidad de las soluciones bajo control computacional. Segundo, resulta necesario ampliar el modelo con restricciones operativas realistas: límites de combustible, velocidades de embarcación, ventanas meteorológicas y la presencia de zonas marítimas restringidas o reguladas. Integrar estas variables permitirá planes más precisos y desplegables. Tercero, es conveniente incluir consideraciones económicas en la lógica de optimización, de modo que el análisis de costos explicite los

compromisos entre potencial geológico, riesgo ambiental y gasto asociado a la adquisición de datos y a las operaciones *offshore*. Cuarto, las próximas iteraciones deberían evolucionar hacia formulaciones multicriterio que contemplen, de manera simultánea, dimensiones geológicas, ambientales, económicas e incluso sociales, acordes con la naturaleza compleja y multiactor de los proyectos energéticos.

Por último, a medida que el *hardware* cuántico madure —con más qubits disponibles y mejores esquemas de corrección de errores— será valioso explorar implementaciones de QAOA con mayor profundidad de circuitos. Comparar su rendimiento frente a heurísticas clásicas aportará evidencia sobre las condiciones bajo las cuales puede materializarse una ventaja cuántica en tareas de planeación y logística bajo incertidumbre. Esta investigación constituye un paso inicial para traducir modelos cuánticos abstractos en herramientas operativas con relevancia práctica para la planificación exploratoria.

Declaración sobre uso de IA

Se utilizaron herramientas de inteligencia artificial de manera limitada y exclusivamente con fines de apoyo editorial, particularmente en procesos de mejora gramatical y claridad de redacción. Todas las decisiones académicas, la construcción teórica, la interpretación de resultados y la verificación científica del contenido son responsabilidad plena del autor.

Referencias

Acampora, G., Chiatto, A., & Vitiello, A. (2023). Genetic algorithms as classical optimizer for the Quantum Approximate Optimization Algorithm. *Applied Soft Computing, 142*. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110296

Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2009). *Informe de Prospectividad*.

Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2025). Geovisor de tierras. https://geovisor.anh.gov.co/tierras/

Blekos, K., Brand, D., Ceschini, A., Chou, C. H., Li, R. H., Pandya, K., & Summer, A. (2024). A review on Quantum Approximate Optimization Algorithm and its variants. *Physics Reports, 1068*, 1-66. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.03.002

Boone, T., Fahimnia, B., Ganeshan, R., Herold, D. M., & Sanders, N. R. (2025). Generative AI: Opportunities, challenges, and research directions for supply chain resilience. Transportation Research Part *E: Logistics and Transportation Review, 199*, 104135. https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104135

Bouchmal, O., Cimoli, B., Stabile, R., Vegas Olmos, J. J., & Tafur Monroy, I. (2025). Quantum Approximate Optimization Algorithm applied to multi-objective routing for large scale 6G networks. *Computer Networks, 267*. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2025.111345

Dong, Y., Meng, X., Lin, L., Kosut, R., & Whaley, K. B. (2020). Robust control optimization for quantum approximate optimization algorithms. *IFAC-PapersOnLine, 53*(2), 242-249. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.130

Geda, M. W., & Tang, Y. M. (2025). Adaptive hybrid quantum-classical computing framework for deep space exploration mission applications. *Journal of Industrial Information Integration, 44*. https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100803

Huo, D., Gu, W., Guo, D., & Tang, A. (2024). The service trade with AI and energy efficiency: Multiplier effect of the digital economy in a green city by using quantum computation based on QUBO modeling. *Energy Economics, 140*. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107976

Jun, K. (2024). QUBO formulations for a system of linear equations. *Results in Control and Optimization, 14*. https://doi.org/10.1016/j.rico.2024.100380

Kurowski, K., Pecyna, T., Slysz, M., Różycki, R., Waligóra, G., & Węglarz, J. (2023). Application of quantum approximate optimization algorithm to job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research, 310*(2), 518-528. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.03.013

Lins, I. D., Araújo, L. M. M., Maior, C. B. S., Teixeira, E. S., Bezerra, P. T. L., Moura, M. J. das C., & Droguett, E. L. (2025). Quantum-based optimization methods for the linear redundancy allocation problem: A comparative analysis. *Reliability Engineering and System Safety, 262*. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111153

Liu, Y., Qian, Y., Wang, L., Zhang, Z., & Yu, X. (2025). Rapidly trainable and shallow-compiled quantum approximate optimization algorithm for maximum likelihood detection. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics, 548*. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2025.130541

McCollum, J., & Krauss, T. (2021). QUBO formulations of the longest path problem. *Theoretical Computer Science, 863*, 86-101. https://doi.org/10.1016/j.tcs.2021.02.021

Pan, Y., Tong, Y., Xue, S., & Zhang, G. (2022). Efficient depth selection for the implementation of noisy quantum approximate optimization algorithm. *Journal of the Franklin Institute, 359*(18), 11273-11287. https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2022.10.027

Rodríguez, I., Bulnes, M., Poblet, J., Masini, M., & Flinch, J. (2021). Structural style and evolution of the offshore portion of the Sinu Fold Belt (South Caribbean Deformed Belt) and adjacent part of the Colombian Basin. *Marine and Petroleum Geology, 125*. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104862

Ruan, Y., Yuan, Z., Xue, X., & Liu, Z. (2023). Quantum approximate optimization for combinatorial problems with constraints. *Information Sciences, 619*, 98-125. https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.11.020

Suárez Bermúdez, L., Ramírez Camargo, L., Yáñez, E., Neele, F., & Faaij, A. (2025). CO2 transport and storage potential in the Caribbean Sea, Colombia. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 144*. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2025.104361

Vadyala, S. R., & Betgeri, S. N. (2023). General implementation of quantum physics-informed neural networks. *Array, 18*. https://doi.org/10.1016/j.array.2023.100287

Vargas, C. A. (2012). Evaluating total Yet-to-Find hydrocarbon volume in Colombia. *Earth Sciences Research Journal, 16*(Special issue), 1-246. https://n9.cl/drl7p

Territorio y emprendimiento familiar en Chía, Colombia: desafíos de la informalidad, la viabilidad y la equidad de género en áreas rurales

Segundo Leonardo Cortés-López[1]

Artículo de investigación

Fecha de recepción: 20 de junio de 2025 ▪ **Fecha de aceptación:** 31 de julio de 2025 ▪ **Fecha de publicación:** 12 de junio de 2026

Universidad de Cundinamarca, Chía, Colombia. sleonardocortes@ucundinamarca.edu.co

Cortés-López, S. L. (2026). Territorio y emprendimiento familiar en Chía, Colombia: desafíos de la informalidad, la viabilidad y la equidad de género en áreas rurales. Revista de Investigaciones Uniagraria, 13(1), 93-108.

Resumen

Este artículo analiza la viabilidad y la segmentación de micro y pequeñas empresas de carácter familiar en Chía, Colombia, mediante un esquema de diagnóstico impulsado por datos. La motivación surge de las elevadas tasas de mortalidad empresarial en la zona, asociadas a prácticas informales, asimetrías de poder de género y baja adopción tecnológica. A partir de un cuestionario estructurado, se recopilaron datos de 180 emprendedores y 7 actores institucionales que cubren dimensiones económicas, sociales y digitales. El estudio emplea un enfoque mixto, que combina estadística exploratoria, análisis de conglomerados y talleres participativos de validación para identificar perfiles críticos de viabilidad y cuellos de botella. Se construye una segmentación estratégica en tres perfiles operativos (A, B y C), cada uno definido según el nivel de madurez empresarial y la distribución de los emprendimientos en la muestra. El perfil A (≈ 20 %) corresponde a iniciativas en etapa de ideación que requieren acompañamiento intensivo. El perfil B (≈ 65 %) agrupa unidades con operación básica que necesitan fortalecimiento en gestión administrativa, comercialización y planeación. El perfil C (≈ 15 %) incluye emprendimientos con procesos parcialmente consolidados que demandan posicionamiento y acceso a mercados ampliados. Cada grupo presenta patrones diferenciados en acceso a mercados, uso de herramientas digitales, dinámicas del hogar y cumplimiento normativo. Los resultados evidencian la necesidad de generar políticas públicas diferenciadas que atiendan vulnerabilidades, promuevan la inclusión digital y fortalezcan la articulación de diversas instituciones. Se resalta la pertinencia de estrategias con enfoque de género y adecuación territorial en los programas locales de apoyo empresarial.

Palabras clave: Colombia, desarrollo rural, emprendimiento familiar, género, inclusión digital, informalidad, propiedad empresarial, segmentación del emprendimiento, viabilidad empresarial.

[1] Universidad de Cundinamarca, Chía, Colombia

Territory and Family Entrepreneurship in Chía, Colombia: Challenges of Informality, Viability, and Gender Equity in Rural Areas

Abstract

This paper investigates how viable family-owned micro and small enterprises (MSEs) are in Chía, Colombia, and how they cluster into actionable segments, using a diagnostic approach grounded in empirical data. The inquiry is driven by persistently high closure rates among local firms, frequently tied to informality, unequal gender power relations, and limited uptake of digital tools. Evidence was gathered through a structured survey administered to 180 entrepreneurs and 7 institutional actors, spanning economic, social, and digital facets of business practice. A mixed-methods design—combining exploratory statistics, cluster analytics, and participatory validation workshops—was applied to surface core viability patterns and operational bottlenecks. As a result, a strategic segmentation into three operational profiles (A, B, and C) is developed, defined according to the level of business maturity and the distribution of enterprises within the sample: Profile A (≈ 20%) corresponds to early-stage initiatives that require intensive support; Profile B (≈ 65%) includes businesses with basic operations that need strengthening in administrative management, commercialization, and planning; and Profile C (≈ 15%) comprises enterprises with partially consolidated processes that require market positioning and access to expanded markets. Each group exhibits distinct patterns in market access, use of digital tools, household dynamics, and regulatory compliance. The findings highlight the need for differentiated public policies that address structural vulnerabilities, promote digital inclusion, and strengthen institutional coordination. Furthermore, the relevance of gender-sensitive and territorially adapted strategies in local business support programs is emphasized..

Keywords: Family entrepreneurship, business viability, informality, entrepreneurship segmentation, gender, business ownership, digital inclusion, rural development, Colombia.

Introducción

En las últimas décadas, el análisis conjunto de los hogares y las unidades productivas ha cobrado una relevancia creciente en los estudios sobre desarrollo económico, formulación de políticas públicas y sostenibilidad empresarial. Este enfoque reconoce que las decisiones económicas de los hogares están profundamente entrelazadas con las actividades emprendedoras, algo especialmente evidente en escenarios caracterizados por la ruralidad y la informalidad (Rautiainen *et al*., 2025; Y. Zhang *et al*., 2025). Bajo esta mirada, el emprendimiento familiar y los negocios de base doméstica empiezan a entenderse como mecanismos resilientes que permiten generar ingresos, proteger activos y transferir conocimiento de manera intergeneracional (Aldrich *et al*., 2021; Monteith & Camfield, 2019). Para abordar estos fenómenos se requiere un marco analítico más amplio que considere simultáneamente dinámicas familiares, condiciones institucionales, restricciones financieras y el acceso desigual a tecnologías e infraestructuras (M. Zhang *et al*., 2025; Zou *et al*., 2025). La integración de las decisiones familiares con las empresariales constituye una vía para diseñar políticas públicas más efectivas en materia de desarrollo territorial, cohesión social y reducción de brechas estructurales (Bahadir *et al*., 2024; Niroomand & Jenkins, 2020).

La literatura empírica demuestra que las decisiones financieras de los hogares —como el nivel de endeudamiento, la tenencia de activos o la pertenencia a redes sociales— repercuten de forma significativa en la formalidad, la estructura y la sostenibilidad de los emprendimientos familiares (Jia *et al*., 2025; Rivero Wildemauwe & Sanroman, 2022). Así, la propiedad compartida de un negocio entre distintos miembros del hogar puede generar tensiones en los procesos de toma de decisión, con efectos sobre las inversiones, las posibilidades de crecimiento o el acceso a mecanismos de protección, como seguros empresariales de salud (Tran & Krueger, 2025). De igual manera, la difusión de tecnologías digitales ha favorecido la expansión de los negocios domiciliarios, sobre todo en las áreas rurales, donde las plataformas en línea han permitido incrementar los ingresos de los hogares y reducir la dependencia de intermediarios (Qiuyun *et al*., 2025). Estas interrelaciones de decisiones domésticas, entornos institucionales y estrategias empresariales ponen de manifiesto la necesidad de aproximaciones integradoras y de carácter sistémico (Aldrich *et al*., 2021).

Desde esta perspectiva, el emprendimiento familiar se ha definido como un fenómeno heterogéneo y multifacético, con trayectorias diversas. Las empresas familiares cumplen un rol dual, ya que operan como unidades económicas y estructuras sociales que articulan generaciones, territorios, roles de género y expresiones culturales locales (Hu *et al*., 2023). Elementos como la sucesión intergeneracional, la redistribución de activos, la construcción de identidad territorial y las dinámicas de género resultan determinantes para la sostenibilidad y permanencia de las empresas en el mercado (Porfírio *et al*., 2020; Pouliquen, 2026). En este sentido, la noción de *family embeddedness* (incrustación familiar) se ha utilizado para enfatizar cómo los lazos emocionales, las raíces territoriales y la reciprocidad en el hogar condicionan la toma de decisiones estratégicas en las firmas (Aldrich *et al*., 2021; Aldrich *et al*., 2023). Todo ello demanda interpretaciones más finas del emprendimiento, que trasciendan la lógica de la racionalidad económica individualista y se orienten hacia un marco de análisis con mayor anclaje social.

Factores estructurales como el acceso al crédito, la orientación de la política monetaria o la calidad de las instituciones también inciden en la capacidad de los hogares para sostener sus unidades empresariales en el tiempo (Cann *et al*., 2025; M. Zhang *et al*., 2025). Programas de alivio económico, como la entrega de transferencias directas a los hogares, han mostrado efectos positivos en el consumo local y en la supervivencia de pequeños negocios (Fernández, 2023). Sin embargo, dichos impactos suelen estar mediados por la fortaleza de las redes sociales, la solidez institucional y los niveles de informalidad laboral predominantes (Kim & Lee, 2024; Oviedo *et al*.,

2025). La agenda investigativa emergente en la intersección de crédito, confianza institucional y decisiones emprendedoras de los hogares requiere, por tanto, metodologías híbridas y diseños con base territorial.

Evidencia empírica de Chía, Colombia

En el municipio de Chía, situado en el departamento de Cundinamarca (Colombia), se observa en los últimos años un aumento considerable en la participación de los hogares en actividades de emprendimiento familiar e informal, especialmente en sectores como el comercio minorista, la producción artesanal y los servicios personales. Este dinamismo, no obstante, convive con fragilidades estructurales en materia de capacidades financieras, formalización empresarial y sostenibilidad de largo plazo, lo cual se traduce en altas tasas de cierre, persistencia de la informalidad y bajo crecimiento de los ingresos (Barbosa *et al*., 2024). Investigaciones regionales señalan que una gran proporción de microempresas funciona sin registro formal, carece de prácticas de planeación y depende fuertemente de miembros del hogar para las decisiones estratégicas (Aguilar *et al*., 2022). Adicionalmente, se evidencia una notable fragmentación en la oferta de capacitación técnica, el acompañamiento institucional y el acceso a créditos, lo que dificulta el fortalecimiento de capacidades empresariales sostenibles en el territorio (Trujillo-Lambert *et al*., 2023).

En este contexto, las mujeres emprendedoras y los jóvenes rurales enfrentan obstáculos adicionales vinculados a cargas de cuidado, desconfianza hacia las instituciones y limitado acceso a redes de comercialización digital (Castillo *et al*., 2022). La situación se agrava ante la carencia de políticas integrales que conecten los sistemas de producción familiar con las dinámicas económicas de Chía y su área metropolitana (Oviedo *et al*., 2025). De allí la urgencia de avanzar en modelos analíticos que incorporen simultáneamente las dimensiones del hogar, la producción informal y las condiciones territoriales (Tobar Arias *et al*., 2023). Este tipo de enfoque puede contribuir al diseño de políticas públicas más pertinentes y efectivas para la región.

Los datos recogidos en trabajo de campo y en programas académicos de apoyo a unidades familiares en Chía muestran también patrones recurrentes de vulnerabilidad frente a choques económicos o variaciones en la demanda local (Barbosa *et al*., 2024). Un estudio de caso reportó, por ejemplo, que más del 60 % de los negocios encuestados había experimentado cierres temporales o reducciones abruptas en sus ingresos debido a estructuras organizacionales y financieras débiles (Aguilar *et al*., 2022). En este sentido, la baja alfabetización financiera, la carencia de registros contables básicos y la informalidad fiscal impiden planificar el crecimiento o acceder a programas públicos de apoyo (Vásquez *et al*., 2019). Aunque algunos emprendedores emplean tecnologías elementales como redes sociales o WhatsApp, estas herramientas suelen carecer de integración con estrategias comerciales formales, revelando la existencia de una brecha digital funcional (Trujillo-Lambert *et al*., 2023).

A pesar del potencial productivo del territorio y su cercanía a Bogotá, la mayoría de los emprendedores locales permanece aislada de redes de apoyo y de los mercados regionales (Tobar Arias *et al*., 2023). Este panorama reafirma la necesidad de concebir el emprendimiento familiar no solo como una actividad económica, sino como una construcción social de múltiples dimensiones, anclada en la vida doméstica. En consecuencia, se requieren instrumentos de análisis que integren las decisiones del hogar, las redes de apoyo y la lógica empresarial en un sistema coherente. Una perspectiva de este tipo permitiría aumentar la pertinencia y el impacto de las intervenciones futuras destinadas a consolidar el ecosistema emprendedor rural-urbano de Chía.

Brecha de investigación y estructura del documento

A partir de la literatura internacional y de los hallazgos empíricos en Colombia —con

énfasis en el municipio de Chía— este estudio identifica una brecha crítica en el análisis de la relación entre hogares y emprendimientos. Los enfoques dominantes suelen abordar de manera separada la dinámica empresarial y la doméstica, desconociendo las interdependencias que inciden en la viabilidad de los negocios familiares, en particular en territorios de transición rural-urbana como Chía. Esta desconexión ha limitado el desarrollo de políticas coherentes y sostenibles que integren empoderamiento económico, cohesión social y planeación territorial.

En este marco, el presente documento de trabajo ofrece una revisión sistemática y estructurada de la interacción de hogar-empresa, la cual está organizada en cuatro dimensiones fundamentales: 1) vínculos financieros y procesos de decisión conjunta; 2) dinámicas familiares, sucesión e identidad territorial; 3) informalidad, redes sociales y capital relacional, y 4) tecnologías digitales como habilitadoras del emprendimiento. La revisión aporta tanto elementos teóricos como orientaciones prácticas para el diseño de estrategias de desarrollo local, programas de inclusión financiera e iniciativas de capacitación emprendedora. En suma, constituye una base conceptual sólida para investigaciones aplicadas y para la formulación de intervenciones focalizadas en Chía y en otros territorios con características similares.

Revisión de la literatura

Partiendo de la importancia de las empresas familiares como unidades económicas fundamentales tanto en territorios rurales como en áreas urbanas periféricas, la literatura refleja un creciente interés en comprender los factores multidimensionales que configuran sus trayectorias. Particularmente en economías emergentes, donde convergen debilidades institucionales, informalidad y dinámicas de género, el emprendimiento familiar se convierte no solo en una estrategia de subsistencia, sino también en un complejo sistema socioeconómico. Investigaciones recientes subrayan la necesidad de marcos integradores que exploren las interdependencias de las dinámicas del hogar, la toma de decisiones empresariales y fuerzas contextuales más amplias, como la política pública, el acceso digital y la infraestructura territorial.

Interdependencias de hogares, empresas y modelos de negocio familiares

Diversos estudios han resaltado la relevancia de comprender las conexiones que hay entre hogares, empresas e infraestructura esencial en escenarios de disrupción. Dubaniowski y Heinimann (2021) proponen un marco conceptual que ilustra cómo una interrupción en cualquiera de estos sistemas genera efectos en cascada sobre los demás, lo que subraya la urgencia de enfoques interconectados para fortalecer la resiliencia territorial. Este planteamiento cobra fuerza con su aplicación práctica (Dubaniowski & Heinimann, 2021), donde se demuestra cómo las dinámicas de interdependencia involucran a actores comunitarios, gubernamentales y privados. En la misma dirección, investigaciones sobre la confiabilidad del suministro eléctrico evidencian que tanto los hogares como las empresas están dispuestos a pagar más por una infraestructura energética robusta, lo que confirma la percepción compartida de riesgo y la necesidad de mecanismos de protección frente a disrupciones (Niroomand & Jenkins, 2020).

Las evaluaciones de madurez organizacional en resiliencia señalan, además, la ausencia sistémica de preparación frente a disrupciones prolongadas, especialmente en pequeñas y medianas empresas (Golinska-Dawson *et al*., 2024). Esta carencia está directamente vinculada a la baja capacidad adaptativa y la dependencia de recursos externos que caracterizan tanto a los hogares vulnerables como a las empresas familiares (Cann *et al*., 2025; Dubaniowski & Heinimann, 2020). Por ello, resulta fundamental avanzar hacia modelos de intervención multisistémicos que integren simultáneamente la sostenibilidad empresarial, la estabilidad del hogar y la infraestructura crítica.

Tales modelos tienen el potencial de reforzar la viabilidad de los sistemas sociales y económicos desde un enfoque resiliente e interdependiente.

En este marco, la familia se configura como núcleo organizador de la actividad empresarial y pieza clave para explicar la viabilidad económica en contextos locales (Pittino *et al*., 2020). En múltiples regiones, el emprendimiento familiar ha demostrado ser un mecanismo adaptativo y resistente frente a crisis económicas y sociales (Basco *et al*., 2019; Zahra, 2022). Más allá de su papel económico, la empresa familiar constituye también una estructura sociocultural que facilita la transmisión de valores, conocimientos y capital entre generaciones (Aldrich *et al*., 2023). Este carácter transgeneracional es crucial para mantener la identidad y el control de la propiedad incluso frente a disrupciones globales (Dubaniowski & Heinimann, 2021).

No obstante, el proceso de sucesión está condicionado por factores emocionales, relaciones de poder y estructuras formales e informales que en gran medida determinan la continuidad o fracaso de la organización (Lara-Bocanegra *et al*., 2022). En paralelo, nuevas investigaciones subrayan el papel transformador de las mujeres en las empresas familiares, cuestionando estructuras patriarcales y promoviendo modelos de gestión más justos (Y. Zhang *et al*., 2025). En conjunto, estos hallazgos permiten entender a la familia no únicamente como recurso empresarial, sino como agente activo que moldea, sostiene y transforma el emprendimiento a lo largo del tiempo (Rautiainen *et al*., 2025).

Políticas públicas, crédito y entornos habilitadores del emprendimiento familiar

El entorno institucional y las políticas públicas cumplen una función decisiva en el acceso al crédito y en la consolidación de los negocios familiares, particularmente en contextos emergentes. M. Zhang (2025) demuestra que las políticas monetarias orientadas al financiamiento empresarial, así como los mecanismos de refinanciación respaldados por activos, mejoran sustancialmente el acceso al crédito en hogares vinculados a actividades emprendedoras. Este hallazgo confirma que las intervenciones focalizadas son capaces de reducir barreras estructurales, especialmente en sectores marginados o informales.

En áreas rurales, donde las familias combinan ingresos agropecuarios con actividades empresariales, los programas de financiamiento adecuados se convierten en una herramienta clave para fomentar la inversión y reforzar la resiliencia frente a choques económicos (Pouliquen, 2026). Sin embargo, la falta de correspondencia entre los diseños institucionales y las prácticas empresariales locales sigue siendo un obstáculo relevante. Tal como exponen Oviedo *et al*. (2025), gran parte de los marcos regulatorios parten de un modelo de emprendimiento formal e individual, lo que excluye a negocios familiares o colectivos en situación de informalidad. Esta desarticulación entre las políticas y las realidades territoriales limita la efectividad de las intervenciones públicas, en particular en países en desarrollo.

Género, poder intrafamiliar y procesos de decisión empresarial

El análisis de género en microempresas y empresas familiares permite identificar cómo las relaciones intrahogar influyen en la gestión y toma de decisiones. Pouliquen *et al*. (2026) evidencian que los derechos de propiedad sobre los activos empresariales impactan directamente en la asignación de recursos, la autonomía y el bienestar individual en la familia. En este sentido, las mujeres que logran un reconocimiento formal como propietarias acceden a un mayor control sobre ingresos y decisiones de inversión, con beneficios tanto económicos como sociales (Lara-Bocanegra *et al*., 2022).

Estos hallazgos indican que el empoderamiento formal —mediante títulos de propiedad o reconocimiento legal— puede transformar las dinámicas de poder y marcar el rumbo empresarial. Monteith y Camfield (2019)

complementan esta idea al mostrar cómo las mujeres emprendedoras desafían narrativas tradicionales de género, redefiniendo sus roles en el negocio familiar y en la comunidad. El emprendimiento, por tanto, se revela como una estrategia económica y a la vez como un acto político con capacidad para modificar jerarquías sociales (Yang *et al*., 2025; Yu *et al*., 2023). Sin embargo, tales procesos están mediados por el capital social, los niveles de educación y las normas culturales dominantes (Basco *et al*., 2019). De ahí la importancia de impulsar intervenciones específicas que favorezcan entornos inclusivos y fortalezcan la agencia de las mujeres en los negocios familiares (Monteith & Camfield, 2019).

Así mismo, los roles de género influyen en los procesos de sucesión y continuidad de las empresas. Aldrich *et al*. (2021) sostienen que, pese al aumento de la participación femenina en los negocios familiares, aún persisten barreras invisibles que restringen el acceso a posiciones de liderazgo, especialmente en entornos con lógicas patriarcales arraigadas. La figura del "patriarca fundador" suele prevalecer como ideal de liderazgo, relegando a las mujeres a funciones secundarias incluso cuando poseen competencias iguales o superiores. Esta invisibilidad socava no solo el empoderamiento femenino, sino también la sostenibilidad a largo plazo de la empresa, al limitar el potencial de innovación intergeneracional (Leunbach, 2021).

Rautiainen *et al*. (2025) destacan que las transiciones generacionales exitosas ocurren con mayor frecuencia en aquellas organizaciones donde las mujeres participan activamente en las decisiones estratégicas, sobre todo cuando la identidad familiar es fuerte. No obstante, para que este cambio sea sostenible, se requiere una transformación cultural profunda que atraviese tanto el ámbito doméstico como el empresarial. La participación de las mujeres en redes empresariales, programas de liderazgo y marcos normativos sensibles al género resulta crucial para revertir estas dinámicas (Aldrich *et al*., 2021). Así, se promueve una visión de emprendimiento familiar más equitativa, resiliente y sostenible (Barbosa *et al*., 2024).

Tecnologías digitales, informalidad y emprendimiento rural

La incorporación de tecnologías digitales en los territorios rurales ha abierto oportunidades inéditas para los negocios familiares, en especial en hogares agrícolas (Qiuyun *et al*., 2025). Zou *et al*. (2025) muestran que el uso de internet y plataformas móviles influye en la decisión de los hogares rurales de diversificar hacia actividades no agrícolas, actuando como catalizador de nuevas formas de emprendimiento. Este acceso digital contribuye a reducir barreras de información y mercado, permitiendo a pequeños productores mejorar sus precios de venta, acceder a nuevos clientes y vincularse a redes de suministro más eficientes (Hu *et al*., 2023).

De igual forma, las plataformas digitales fortalecen el conocimiento de derechos, obligaciones e incentivos disponibles, lo que incide en la disminución de la informalidad empresarial (Zou *et al*., 2025). No obstante, la expansión digital es desigual y depende del capital humano, la infraestructura tecnológica y el marco institucional de cada territorio. A pesar de los avances, persisten brechas digitales asociadas al género, la edad y la localización geográfica, limitando el alcance de estas tecnologías (Haque *et al*., 2025). En este sentido, las TIC deben ser entendidas no solo como herramientas operativas, sino como factores estructurales que redefinen los límites del emprendimiento rural y la viabilidad económica de los hogares.

La informalidad, por su parte, sigue siendo un rasgo distintivo de los negocios familiares en áreas rurales y urbanas periféricas, con efectos directos sobre la sostenibilidad y la protección social de los emprendedores. Rivero *et al*. (2022) documentan que muchas familias optan por permanecer en la informalidad debido a los elevados costos de cumplimiento, la complejidad de las regulaciones y la escasa percepción de valor en la formalización.

Esta condición es particularmente frecuente en economías en desarrollo, donde el emprendimiento familiar surge como una respuesta a la exclusión estructural de los mercados laborales formales.

Sin embargo, como señalan Vásquez *et al*. (2019), incluso en entornos informales, las empresas familiares cumplen una función esencial en la economía local, al generar empleo y reforzar la cohesión territorial. Para enfrentar esta dualidad, se requieren enfoques que reconozcan la diversidad de estas empresas y promuevan procesos graduales de formalización adaptados a las condiciones locales (Kim & Lee, 2024). El aprovechamiento estratégico de la tecnología, junto con incentivos y programas de formación adecuados, puede constituir un puente entre la informalidad y la plena integración al sistema económico. En consecuencia, resulta indispensable una visión integral que articule innovación tecnológica, fortalecimiento institucional y desarrollo territorial, orientada a consolidar un modelo más inclusivo y sostenible de emprendimiento familiar en contextos rurales.

Metodología

El presente estudio implementó un enfoque participativo de métodos mixtos, en el que se articularon componentes diagnósticos, pedagógicos y tecnológicos con el propósito de examinar la estructura y las necesidades de las empresas familiares gestionadas por estudiantes de la Universidad de Cundinamarca. El diseño metodológico se fundamentó en una revisión documental inicial sobre el contexto socioeconómico y territorial, la cual permitió reconocer de manera crítica las restricciones estructurales que enfrentan los pequeños negocios familiares, particularmente aquellos localizados en zonas rurales y periurbanas del departamento.

A partir de esta base contextual, el equipo investigador construyó un instrumento de caracterización diagnóstica, diseñado como encuesta digital y aplicada mediante la plataforma Google Forms. Esta herramienta posibilitó la recolección estandarizada de información proveniente de más de 195 unidades de emprendimiento, con énfasis en dimensiones clave tales como nivel de madurez empresarial, estructura organizativa, necesidades de capacitación, estrategias de comercialización y retos productivos. Además, se incluyeron ítems relacionados con el grado de formalización, competencias digitales, uso de herramientas financieras y roles de género en la toma de decisiones. Antes de su aplicación, el cuestionario fue validado por docentes supervisores y posteriormente difundido con el apoyo de estudiantes facilitadores y personal académico.

El procesamiento de los datos —compuesto por 187 respuestas completas y válidas— se llevó a cabo en Microsoft Excel. Esto permitió aplicar técnicas de análisis cuantitativo mediante estadísticas descriptivas (frecuencias, porcentajes y tablas de doble entrada), la representación visual de resultados en gráficos de barras, diagramas circulares y cuadros comparativos. Paralelamente, se diseñó un modelo de segmentación orientado a identificar tres perfiles estratégicos de negocio a partir de variables como tiempo de operación, grado de formalización y uso de herramientas digitales:

- Empresas nacientes: menos de un año de funcionamiento, fuerte dependencia de mano de obra familiar y niveles mínimos de formalización e integración digital.

- Empresas en consolidación: entre uno y tres años de operación, con avances en organización estructural y demandas específicas de capacitación.

- Empresas en expansión: más de tres años de trayectoria, con aspiraciones de crecimiento y una marcada orientación hacia el acceso a mercados y la optimización de procesos.

La encuesta también cumplió un papel pedagógico, pues estimuló a los participantes a reflexionar sobre sus prácticas empresariales y

a identificar de manera autónoma sus vacíos de aprendizaje. Dicho proceso sirvió como insumo directo para la elaboración de un plan pedagógico articulado con los cuatro Resultados Esperados de Aprendizaje (REA) de la asignatura y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 4 ("Educación de calidad"), el ODS 8 ("Trabajo decente y crecimiento económico") y el ODS 10 ("Reducción de las desigualdades").

Para la coordinación entre docentes, estudiantes y beneficiarios se emplearon herramientas digitales colaborativas como Google Drive y WhatsApp, que facilitaron el intercambio constante de materiales, la planificación y el seguimiento de actividades. Estas plataformas garantizaron la participación y la accesibilidad de los actores involucrados sin requerir encuentros presenciales.

Así mismo, la metodología incorporó un componente cualitativo de carácter participativo. Se llevaron a cabo sesiones colectivas de retroalimentación en las que se socializaron los resultados con los estudiantes participantes, se validaron las categorías analíticas empleadas y se recogieron sugerencias para ajustar la estrategia de formación. Dichas dinámicas fortalecieron la apropiación de los datos, consolidaron el ejercicio reflexivo y permitieron adecuar los contenidos curriculares a las necesidades reales del contexto.

De forma adicional, el diseño metodológico incentivó la colaboración horizontal entre estudiantes, docentes y emprendedores comunitarios. La cocreación de soluciones —que incluyó la construcción de estudios de caso compartidos, la definición de hojas de ruta de intervención y la producción de materiales de apoyo— garantizó que el modelo formativo respondiera a los desafíos del entorno y a las limitaciones locales. Aunque no se recurrió al uso de tecnologías digitales avanzadas como inteligencia artificial, *blockchain* o plataformas LMS, la utilización efectiva de herramientas básicas evidenció que es posible consolidar intervenciones educativas inclusivas y escalables mediante tecnologías accesibles.

En síntesis, esta propuesta metodológica corroboró el potencial del vínculo universidad-comunidad tanto para diagnosticar como para transformar realidades territoriales a través del emprendimiento, fortaleciendo los compromisos institucionales en materia de impacto social, equidad y aprendizaje aplicado en contextos vulnerables.

Resultados

A continuación, se exponen los hallazgos centrales obtenidos a partir del trabajo de campo y el análisis documental realizados en Chía (Cundinamarca). El propósito fue captar la heterogeneidad, los desafíos y el potencial de desarrollo de los emprendimientos familiares en su entorno local, poniendo especial énfasis en su articulación con las dinámicas del hogar, los patrones de informalidad y las condiciones de acceso al conocimiento y al acompañamiento institucional. Para ello, los resultados se estructuran en tres bloques analíticos: 1) una caracterización general de las unidades encuestadas; 2) un ejercicio de segmentación y tipologías, y 3) hallazgos clave en torno a brechas de conocimiento, financiamiento y redes.

Esta organización permite una lectura integral del funcionamiento real de los negocios familiares —más allá de su dimensión meramente económica—, subrayando su anclaje social y territorial. A la vez, ofrece evidencia empírica que dialoga con los vacíos teóricos señalados en la literatura, en particular respecto de las interdependencias entre familia, informalidad y emprendimiento en territorios semirrurales de América Latina. Los resultados no se limitan a describir, sino que alimentan una reflexión crítica sobre los límites de los modelos tradicionales de apoyo y sobre las oportunidades para diseñar intervenciones públicas y privadas ajustadas al contexto.

Caracterización general de los negocios familiares analizados

En la fase inicial del proyecto ISU (Innovación Social Universitaria), se caracterizaron 180 emprendimientos familiares radicados en el municipio de Chía, mediante un instrumento digital estructurado en Google Forms. La aplicación se realizó con el apoyo de profesionales y estudiantes investigadores, lo que posibilitó recopilar información sobre estado de formalización, nivel de madurez, tipo de actividad productiva, necesidades percibidas, uso de tecnologías digitales y expectativas de crecimiento.

Los datos recabados evidencian una alta concentración de iniciativas de subsistencia y de escala micro, mayoritariamente sustentadas en trabajo familiar no remunerado y con escasa vinculación a sistemas formales de apoyo institucional. El análisis inicial del nivel de madurez permitió agrupar los casos en tres estadios: fase de ideación (perfil A), fase de desarrollo temprano (perfil B) y fase de consolidación (perfil C). La mayoría de los emprendimientos se ubica en el perfil B, lo que sugiere operaciones básicas en marcha y una oferta de productos o servicios definida, pero con debilidades relevantes en planeación financiera, mercadeo, uso de TIC y escalabilidad. Solo una fracción reducida se clasificó como consolidada, con procesos más sólidos en producción, gestión administrativa y orientación de mercado.

Segmentación estratégica y perfiles de intervención

A partir del análisis de madurez y de variables informadas como clave, se construyó una segmentación estratégica que orienta acciones de apoyo diferenciadas según la etapa del negocio (los porcentajes indican la distribución relativa de los emprendimientos familiares caracterizados en la muestra):

- Perfil A (≈ 20 %): iniciativas en ideación que requieren acompañamiento intensivo para definir el propósito productivo, validar la propuesta, detectar oportunidades y clarificar el modelo de negocio.
- Perfil B (≈ 65 %): unidades con operación básica en curso que necesitan fortalecer gestión administrativa, comercialización, control de costos y planeación operativa.
- Perfil C (≈ 15 %): emprendimientos con procesos parcialmente consolidados, que demandan posicionamiento de mercado, diversificación de canales de venta, formalización legal y acceso a mercados ampliados.

Esta segmentación es clave para diseñar itinerarios formativos personalizados, asignar recursos con eficiencia y producir impactos diferenciados acordes con las capacidades de partida de cada emprendimiento.

Hallazgos clave y desafíos para la viabilidad

La viabilidad de los negocios familiares en Chía está modulada por la confluencia de factores estructurales, organizativos y contextuales. En primer término, se constata un elevado grado de informalidad —legal, contable y tributaria— que restringe el acceso al crédito, la entrada a programas públicos y la participación en redes de apoyo. Esta condición se asocia a una percepción institucional negativa y a bajos niveles de alfabetización empresarial.

En segundo lugar, el uso de tecnologías digitales sigue siendo marginal en la mayoría de los emprendimientos de los perfiles A y B, aun cuando existe acceso básico a internet o telefonía móvil. Ello revela una brecha entre la disponibilidad de infraestructura y la utilización estratégica de las TIC para la gestión del negocio.

Adicionalmente, muchas unidades operan como estrategias de supervivencia familiar, con alta dependencia del autofinanciamiento y

ausencia de planificación de mediano plazo. Ante este panorama, se propone implementar rutas de apoyo diferenciadas por perfil —que combinen formación práctica, mentorías personalizadas y sensibilización institucional— para fortalecer la sostenibilidad y viabilidad de los negocios.

Por último, la caracterización pone de relieve la necesidad de coordinar acciones con los actores del ecosistema local de emprendimiento —como instituciones educativas, cámaras de comercio y programas de desarrollo económico— para fortalecer el tejido productivo familiar desde una perspectiva inclusiva y adaptada al territorio.

Discusión

La caracterización de 180 emprendimientos familiares en Chía ofrece sustento empírico a la literatura reciente que subraya las restricciones estructurales e institucionales que condicionan la viabilidad de las pequeñas iniciativas en economías emergentes. En consonancia con Rautiainen *et al*. (2025), los elevados niveles de informalidad detectados en la mayoría de los negocios evidencian la presencia de barreras de entrada —como la complejidad normativa y la escasa percepción de beneficios de la formalización—. La ausencia de registro legal y fiscal, sumada a prácticas administrativas débiles, limita el acceso a financiamiento, a programas públicos y a la inserción en mercados formales. Estas circunstancias consolidan una lógica de supervivencia en la que los negocios familiares operan más como amortiguadores de ingresos que como empresas orientadas al crecimiento (Vásquez *et al*., 2019). En la misma línea, los resultados se alinean con M. Zhang *et al*. (2025), quienes sostienen que la descoordinación institucional entre el diseño de las políticas y la realidad del emprendimiento informal perpetúa la exclusión. Cerrar esta brecha requiere intervenciones específicas que atiendan las limitaciones cotidianas de las unidades familiares —incluidas la simplificación de trámites y las estrategias formativas adaptativas—.

Un segundo aporte clave del estudio se vincula con la baja adopción y el uso poco estratégico de tecnologías digitales, especialmente entre los negocios en fase de desarrollo temprano (perfil B). Aunque muchos hogares disponen de conexión a internet o de dispositivos móviles, carecen de alfabetización digital y de acompañamiento contextual para emplear estas herramientas en la gestión empresarial. Ello refuerza las conclusiones de Zou *et al*. (2025), según las cuales la inclusión digital solo funciona como catalizador de la diversificación productiva cuando va acompañada de formación pertinente y de ecosistemas de apoyo. Los hallazgos también reflejan los retos más amplios de la brecha digital en ámbitos rurales y semiurbanos, donde las diferencias de habilidades, edad y género restringen el potencial transformador de la tecnología (Trujillo-Lambert *et al*., 2023). Por tanto, promover la inclusión digital en emprendimientos familiares debe ir más allá de la conectividad, incorporando el fortalecimiento de capacidades, interfaces sensibles al contexto e integración a cadenas de valor. Así, las herramientas digitales dejan de ser meros recursos operativos para convertirse en habilitadores estructurales de visibilidad, formalidad y resiliencia en contextos vulnerables.

Desde el ángulo de la segmentación, la identificación de tres perfiles estratégicos (A, B y C) confirma la pertinencia de mecanismos diferenciados de apoyo dentro de la política de emprendimiento. En contraposición a los enfoques uniformes, la evidencia respalda una lógica basada en el ciclo de vida, donde cada negocio requiere servicios a la medida según su madurez, recursos y grado de inserción en el mercado. Esta orientación coincide con las recomendaciones de Qiuyun *et al*. (2020), quienes abogan por marcos de política que reconozcan la heterogeneidad de las trayectorias emprendedoras. En concreto: el perfil A demanda acompañamiento intensivo para la ideación y la validación; el perfil B precisa reforzar capacidades gerenciales y de planeación estratégica, y el perfil C necesita apoyo para la consolidación y el acceso a mercados más amplios. La puesta en marcha de rutas diferenciadas puede elevar la efectividad de

las políticas y optimizar la asignación de recursos, al tiempo que promueve una participación económica más inclusiva a escala territorial. Todo ello se alinea con el viraje de la política colombiana hacia programas de emprendimiento localizados y con anclaje social.

Por último, los resultados subrayan la importancia de integrar el emprendimiento familiar en estrategias más amplias de desarrollo territorial y de cohesión social. Muchas de las iniciativas analizadas se sostienen en lógicas comunitarias, dependen de trabajo familiar no remunerado y aportan tanto al empleo local como a economías solidarias. Como muestran estudios latinoamericanos (Aguilar *et al*., 2022), fortalecer estos negocios atañe no solo al crecimiento económico, sino también a la continuidad cultural, al aprendizaje intergeneracional y a la resiliencia en entornos adversos. En consecuencia, la política pública debe evitar la simple trasposición de modelos de empresa formal y, en su lugar, codiseñar instrumentos que respeten la identidad y la complejidad de los emprendimientos familiares. Tender puentes entre prácticas informales y marcos institucionales —mediante procesos graduales de formalización, estrategias colectivas de comercialización y herramientas financieras inclusivas— puede potenciar simultáneamente la viabilidad y la equidad. Esta visión territorializada, respaldada por datos y metodologías participativas, resulta esencial para la sostenibilidad del emprendimiento en escenarios de pospandemia y en contextos marcados por desigualdades estructurales.

Conclusión

Este trabajo presenta un análisis multidimensional del emprendimiento familiar en Chía, Colombia, poniendo el acento en su heterogeneidad estructural, en las barreras institucionales que lo condicionan y en su potencial para un desarrollo inclusivo. El diagnóstico de 180 iniciativas evidenció retos significativos en formalización, adopción de tecnologías digitales, capacidades de gestión y acceso a redes de apoyo. Tales hallazgos convergen con patrones regionales ampliamente documentados en América Latina, donde el emprendimiento de base familiar e informal opera, más que como estrategia de crecimiento, como un amortiguador socioeconómico. No obstante, la segmentación en perfiles estratégicos —emergente, transicional y consolidado— revela trayectorias diversas hacia la viabilidad y subraya la necesidad de mecanismos de apoyo diferenciados. Cada tipo de negocio demanda intervenciones situadas que superen la formación genérica o los programas de crédito estándar.

Desde el ángulo de política pública, los resultados refuerzan la conveniencia de incorporar el emprendimiento familiar en las agendas de desarrollo territorial. En particular, el perfil emergente (A) requiere acompañamiento en ideación, espacios de validación y esquemas de incubación inclusivos, ajustados a iniciativas semiformales y colectivas. El perfil transicional (B) demanda esfuerzos específicos en planeación del negocio, fortalecimiento de capacidades digitales y formalización regulatoria; mientras el perfil consolidado (C) se beneficiaría de instrumentos para escalar, diversificar canales y mercados, e incorporarse a sistemas de compras públicas. En lugar de imponer marcos de cumplimiento rígidos, un enfoque gradual y basado en incentivos puede favorecer la adopción y la sostenibilidad de la formalización.

Así mismo, la tecnología digital debe entenderse como un habilitador estructural y no solo como un recurso operativo. La escasa integración de las TIC en los procesos de negocio —pese al acceso a internet y dispositivos— delata brechas de alfabetización digital y de articulación con cadenas de valor. Los programas públicos han de cerrar ese vacío mediante formación en plataformas pertinentes para mercados rurales y periurbanos, facilitación del ingreso al comercio electrónico y promoción de marcas digitales colectivas. Estos esfuerzos deben atender barreras locales asociadas a género, nivel educativo y limitaciones de conectividad, como destacan Zou *et al*. (2025) y Pouliquen (2026). Solo así

la transformación digital aportará de manera sustantiva a la productividad, la formalización y la resiliencia emprendedora.

En síntesis, promover un emprendimiento familiar viable exige pasar de intervenciones fragmentadas a estrategias sistémicas que articulen herramientas financieras, digitales y organizacionales con enfoques participativos y territorializados. El empleo de metodologías diagnósticas —como la aquí presentada— puede orientar el diseño de políticas adaptativas y basadas en evidencia. En adelante, conviene ampliar el diagnóstico a otros municipios, aplicar evaluaciones de impacto con métodos mixtos e involucrar a los propios emprendedores familiares en la cocreación de instrumentos públicos. De esta forma, gobiernos locales, instituciones académicas y agencias de desarrollo podrán contribuir a economías más inclusivas y resilientes, ancladas en las realidades y aspiraciones de las empresas familiares.

A partir de los resultados y el enfoque metodológico del estudio, surgen varias líneas de investigación y acción aplicada. Primero, se sugiere extender la metodología diagnóstica a otros municipios con perfiles socioeconómicos semejantes —en especial en áreas rurales y periurbanas de la región Bogotá-Cundinamarca—, a fin de habilitar análisis comparativos de dinámicas territoriales e identificar patrones estructurales o cuellos de botella institucionales que afectan al emprendimiento familiar entre regiones. Incrementar el tamaño muestral y la cobertura geográfica robustecerá el modelo de segmentación y sus implicaciones de política.

Segundo, futuras investigaciones deberían incorporar métodos mixtos que combinen diagnósticos cuantitativos con técnicas cualitativas —entrevistas, grupos focales y observación etnográfica— para profundizar en motivaciones, estrategias de adaptación y valores socioculturales que sustentan el emprendimiento familiar. Resulta clave comprender cómo los roles de género, las dinámicas intergeneracionales y las redes informales configuran decisiones empresariales, estrategias de supervivencia y disposición hacia la formalización.

Tercero, una vía promisoria consiste en evaluar el impacto de programas de inclusión digital y de estrategias de innovación pública dirigidas a negocios familiares. Investigaciones futuras podrían medir la efectividad de plataformas de comercio electrónico, mercadeo digital y pagos móviles en el desempeño empresarial y en los avances de formalización. Diseños aleatorizados controlados o cuasiexperimentales permitirían valorar las intervenciones y ajustar los modelos de implementación con base en evidencia empírica.

Por último, se propone explorar el diseño de un observatorio público o sistema de monitoreo del emprendimiento familiar a escala municipal. Esta plataforma facilitaría la recolección de datos en tiempo real, el seguimiento de la evolución de la actividad emprendedora y el apoyo a decisiones de política adaptativa. Un observatorio de este tipo contribuiría a alinear la oferta institucional con las trayectorias empresariales reales, mejorar la coordinación interinstitucional y reforzar la resiliencia y viabilidad de los ecosistemas locales de emprendimiento.

Declaración sobre uso de IA

Las herramientas de inteligencia artificial empleadas en este trabajo fueron utilizadas exclusivamente como apoyo complementario para la revisión del lenguaje y la mejora de la escritura científica. La elaboración del contenido académico, el análisis crítico, la interpretación de la información y la validación final del manuscrito fueron desarrollados íntegramente por el autor.

Referencias

Aguilar, M. G., Jaramillo, J. F., Ddiba, D., Páez, D. C., Rueda, H., Andersson, K., & Dickin, S. (2022). Governance challenges and opportunities for implementing resource recovery from organic waste streams in urban areas of

Latin America: insights from Chía, Colombia. *Sustainable Production and Consumption, 30*, 53-63. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.025

Aldrich, H. E., Álvarez, S. A., Brumana, M., Campopiano, G., & Minola, T. (2023). Entrepreneurship in family firms: What's next? Multilevel embeddedness and individuals' cognition. *Journal of Family Business Strategy, 14*(3). https://doi.org/10.1016/j.jfbs.2023.100583

Aldrich, H. E., Brumana, M., Campopiano, G., & Minola, T. (2021). Embedded but not asleep: Entrepreneurship and family business research in the 21st century. *Journal of Family Business Strategy, 12*(1). https://doi.org/10.1016/j.jfbs.2020.100390

Bahadir, B., Gumus, I., & Schaffer, M. (2024). Does relaxing household credit constraints hurt small business lending? Evidence from a policy change in Texas. *Journal of Corporate Finance, 89*. https://doi.org/10.1016/j.jcorpfin.2024.102682

Barbosa, V., Suárez, M., Cerda, J., & Thoene, U. (2024). Urban structure to determine equitable city growth for spatial justice: A case study of Chía-Bogotá, Colombia. *Journal of Urban Mobility, 5*. https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2024.100080

Basco, R., Calabrò, A., & Campopiano, G. (2019). Transgenerational entrepreneurship around the world: Implications for family business research and practice. *Journal of Family Business Strategy, 10*(4). https://doi.org/10.1016/j.jfbs.2018.03.004

Cann, K., Leichenko, R., Solecki, W., Madajewicz, M., Clemens, M., Howell, N., Kaplan, M., & Herb, J. (2025). Business as usual? Small business responses to compound disasters in coastal New York city and New Jersey. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 119*. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105288

Castillo, J. A., Mora-Valencia, A., & Perote, J. (2022). Moral hazard index for credit risk to SMEs. *International Economics, 172*, 311-323. https://doi.org/10.1016/j.inteco.2021.10.003

Dubaniowski, M. I., & Heinimann, H. R. (2020). A framework for modeling interdependencies among households, businesses, and infrastructure systems; and their response to disruptions. *Reliability Engineering and System Safety, 203*. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107063

Dubaniowski, M. I., & Heinimann, H. R. (2021). Framework for modeling interdependencies between households, businesses, and infrastructure system, and their response to disruptions-application. *Reliability Engineering and System Safety, 212*. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107590

Fernandez, V. (2023). Family entrepreneurship around the world. *International Review of Financial Analysis, 89*. https://doi.org/10.1016/j.irfa.2023.102808

Golinska-Dawson, P., Zysnarska, Z., & Pender, A. (2024). Assessment of the maturity of product-as-a-service business models for household appliances from the perspective of R strategies in Circular Economy. *Procedia CIRP, 122*, 1083-1088. https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.02.038

Haque, Q., Pavlov, O., & Weder, M. (2025). Endogenous business cycles with small and large firms. *European Economic Review, 177*. https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2025.105058

Hu, D., Zhai, C., & Yan, Z. (2023). Do social interactions foster household entrepreneurship? Evidence from online

and offline data from China Family Panel Studies. *China Economic Review, 79*. https://doi.org/10.1016/j.chieco.2023.101965

Jia, X., Zhang, N., Tong, T., Li, Y., & Han, R. (2025). Social networks, financial knowledge, and urban-rural family entrepreneurship. *Finance Research Letters, 76*. https://doi.org/10.1016/j.frl.2025.107029

Kim, J., & Lee, S. (2024). Can stimulus checks to households save the local economy? The impact of South Korea's Covid-19 stimulus on small business sales. *Economic Analysis and Policy, 84*, 159-176. https://doi.org/10.1016/j.eap.2024.08.017

Lara-Bocanegra, A., García-Fernández, J., Gálvez-Ruiz, P., Grimaldi-Puyana, M., & Bohórquez Gómez-Millán, M. R. (2022). Does background matter? Analysis of the influence of sex, socioeconomic status and the existence of an entrepreneurial family member as a precursor to entrepreneurship in university students of Sport Sciences. *Journal of Hospitality, Leisure, Sport and Tourism Education, 31*. https://doi.org/10.1016/j.jhlste.2022.100394

Leunbach, D. (2021). Entrepreneurship as a family resemblance concept: A Wittgensteinian approach to the problem of defining entrepreneurship. *Scandinavian Journal of Management, 37*(1). https://doi.org/10.1016/j.scaman.2021.101141

Monteith, W., & Camfield, L. (2019). Business as family, family as business: Female entrepreneurship in Kampala, Uganda. *Geoforum, 101*, 111-121. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.03.003

Niroomand, N., & Jenkins, G. P. (2020). Estimation of households' and businesses' willingness to pay for improved reliability of electricity supply in Nepal. *Energy for Sustainable Development, 55*, 201-209. https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.02.006

Oviedo, D., Guzmán, L. A., & Oviedo-Dávila, N. (2025). Productive exclusion: Accessibility inequalities and informal employment in Bogotá. *Geoforum, 159*. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2025.104208

Pittino, D., Chirico, F., Baù, M., Villasana, M., Naranjo-Priego, E. E., & Barron, E. (2020). Starting a family business as a career option: The role of the family household in Mexico. *Journal of Family Business Strategy, 11*(2). https://doi.org/10.1016/j.jfbs.2020.100338

Porfírio, J. A., Felício, J. A., & Carrilho, T. (2020). Family business succession: Analysis of the drivers of success based on entrepreneurship theory. *Journal of Business Research, 115*, 250-257. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.11.054

Pouliquen, V. (2026). This business is mine! Intra-household effects of property rights in micro-enterprises. *Journal of Development Economics, 178*. https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2025.103530

Qiuyun, L., Xie, M., & Tang, Y. (2025). Do the E-commerce-induced business clusters increase the income of local rural households? *Economic Analysis and Policy, 86*, 1510-1526. https://doi.org/10.1016/j.eap.2025.04.024

Rautiainen, M., Parada, M. J., Konsti-Laakso, S., & Mukherjee, K. (2025). Tied to the land: How resource redeployment and place identity shape each other in a small farm business. *Journal of Rural Studies, 119*. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2025.103768

Rivero Wildemauwe, J. I., & Sanroman, G. (2022). Household debt and debt to income: The role of business ownership. *The Quarterly Review*

of Economics and Finance, 83, 52-68. https://doi.org/10.1016/j.qref.2021.11.001

Tobar Arias, J. E., Mora Valencia, A., & Benavides Franco, J. (2023). Earnings management to avoid losses: Evidence in non-listed Colombian companies. *Journal of International Accounting, Auditing and Taxation, 53*. https://doi.org/10.1016/j.intaccaudtax.2023.100575

Tran, M. K., & Krueger, P. M. (2025). Minority-owned small businesses and employer-sponsored health insurance. *SSM - Population Health, 31*, 101855. https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2025.101855

Trujillo-Lambert, Y., Osorio-Sanabria, M., Maestre-Gongora, G., & Astudillo, H. (2023). Information Technology Governance in Colombian Small and Medium Companies: An Exploratory Study Using Data Analysis. *Aibi, Revista de Investigacion Administracion e Ingenierias, 11*(1), 66-74. https://doi.org/10.15649/2346030X.3083

Vásquez, J., Aguirre, S., Fuquene-Retamoso, C. E., Bruno, G., Priarone, P. C., & Settineri, L. (2019). A conceptual framework for the eco-efficiency assessment of small- and medium-sized enterprises. *Journal of Cleaner Production, 237*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117660

Yang, M., Ehrnström-Fuentes, M., & Wincent, J. (2025). Big things from small beginnings: Creating and scaling community-based opportunities for sustainable small and local businesses. *Journal of Business Venturing, 40*(5). https://doi.org/10.1016/j.jbusvent.2025.106522

Yu, L., Tang, X., & Huang, X. (2023). Does the business environment promote entrepreneurship?——Evidence from the China Household Finance Survey. *China Economic Review, 79*. https://doi.org/10.1016/j.chieco.2023.101977

Zahra, S. A. (2022). International entrepreneurship by family firms post Covid. Journal of Family Business Strategy, 13(2). https://doi.org/10.1016/j.jfbs.2021.100482

Zhang, M., Lin, M., Sun, Y., & Wu, W. (2025). Targeted monetary policy and household business credit access: Based on the credit asset pledge relending policy. *Emerging Markets Review, 66*. https://doi.org/10.1016/j.ememar.2025.101288

Zhang, Y., Wang, H., Zheng, K., & Yang, W. (2025). Empowering women's entrepreneurship: The role of green knowledge, innovation, and family support. *Journal of Innovation and Knowledge, 10*(1). https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100639

Zou, B., Yang, F., & Mishra, A. K. (2025). Using internet technology for business entrepreneurial choice: Evidence from Chinese farming households. *Smart Agricultural Technology, 10*. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100775

Repensar la educación agrícola superior desde la tecnociencia y la reestructuración curricular

Deivis Suárez-Rivero[1]
Olga Marín-Mahecha[1]
Mauricio A. Sierra-Sarmiento[1]
Edith Patricia Sánchez-Quiñonez[2]
Valentina Arévalo-Marín[3]
Maikel Suárez-Rivero[4]

Artículo de investigación

Fecha de recepción: 20 de junio de 2025 ▪ **Fecha de aceptación:** x: 31 de julio de 2025 ▪ **Fecha de publicación:** 12 de junio de 2026

Deivis Suárez-Rivero, Grupo de Investigación e Innovación Agroindustrial (GINNA), Fundación Universitaria Agraria de Colombia.
suarez.deivis@uniagraria.edu.co

Suárez-Rivero, D., Marín-Mahecha, O., Sierra-Sarmiento, M. A., Sánchez-Quiñonez, E. P., Arévalo-Marín, V., & Suárez-Rivero, M. (2026). Repensar la educación agrícola superior desde la tecnociencia y la reestructuración curricular. Revista de Investigaciones Uniagraria, 13(1), 109-116.

Resumen

El presente documento plantea una reflexión sobre el papel de la educación agrícola superior en un contexto globalizado, marcado por profundas transformaciones tecnológicas, económicas y sociales. Se parte de la idea de que las Instituciones de Educación Superior (IES) deben responder a los actuales y nuevos desafíos de un mundo complejo y en constante cambio, integrando la ciencia, la tecnología y la sociedad. A lo largo del documento, se sostiene que la tecnociencia impulsa un cambio de época que trae consigo la necesidad de replantear los modelos curriculares tradicionales, superando la fragmentación disciplinar para avanzar hacia una formación transdisciplinaria, tecnológica y humanista. En esta vía, se propone una reestructuración que articule la universidad con el sector productivo y rural, basada en la pertinencia social, la innovación y la sostenibilidad. Así mismo, se destaca la necesidad de fortalecer competencias complejas en los futuros profesionales e investigadores, promoviendo el aprendizaje basado en problemas (ABP) y la vinculación de la docencia con la gestión y la extensión. El texto muestra variables estructurales, tales como: globalización, integración regional, mercado educativo, competitividad y planeación participativa, las cuales determinan escenarios posibles para la educación superior latinoamericana, desde el mercado neoliberal, hasta uno sustentable o incluso de antidesarrollo. Se concluye que el escenario deseable debe conjugar desarrollo económico con justicia social, fortaleciendo la autonomía universitaria, la equidad y la sustentabilidad ambiental, de modo que las instituciones que forman profesionales para el agro (agroindustria, ciencias agrarias, medicina veterinaria, zootecnia, entre otras áreas) se conviertan en motores de transformación glocal orientados al bienestar humano y la sostenibilidad del planeta.

Palabras clave: competencias, gestión curricular, innovación educativa, tecnociencia, transformación glocal.

[1] Grupo de Investigación e Innovación Agroindustrial (GINNA), Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia.
[2] Vicerrectoría de Investigación, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia.
[3] Consultorio Jurídico, Universidad San Buenaventura, Bogotá, Colombia.
[4] Escuela de Agronomía, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Bogotá, Colombia.

Rethinking Agricultural Higher Education through Technoscience and Curricular Restructuring

Abstract

This document offers an in-depth reflection on the role of agricultural higher education in a globalized context marked by profound technological, economic, and social transformations. It starts with the idea that higher education institutions must respond to the current and new challenges of a complex and constantly changing world by integrating science, technology, and society. Throughout the document, it is argued that technoscience is driving an epoch-making change that brings with it the need to rethink traditional curricular models, overcoming disciplinary fragmentation to move towards transdisciplinary, technological, and humanistic education. The authors propose a restructuring that links the university with the productive and rural sectors, based on social relevance, innovation, and sustainability. They also highlight the need to strengthen complex skills in future professionals and researchers, promoting problem-based learning and linking teaching with management and outreach. The text shows structural variables such as globalization, regional integration, the education market, competitiveness, and participatory planning, which determine possible scenarios for Latin American higher education: from the neoliberal market to a sustainable or even anti-development one. Finally, it is concluded that the desirable scenario must combine economic development with social justice, strengthening university autonomy, equity, and environmental sustainability, so that institutions that train professionals for agriculture (agronomy, agribusiness, agriculture, veterinary medicine, animal husbandry, among other areas) become engines of glocal transformation oriented toward human well-being and the sustainability of the planet.

Keywords: Educational innovation, competencies, glocal transformation, Technoscience, curriculum management.

Introducción

Partiendo de la premisa de que vivimos en un mundo globalizado, caracterizado por problemas sociales complejos y profundos, los aspectos contenidos en el presente escrito constituyen un tema de especial importancia. Es así como para Gibbons *et al*. (2022), la pertinencia de la formación superior de los individuos está estrechamente relacionada con la vinculación entre universidad y empresa, vista esta última como el sector real o sector productivo, en el marco de la globalización y el neoliberalismo que predomina en la región. Este contexto vislumbrado por el autor permite reconocer el compromiso económico que deben tener las Instituciones de Educación Superior (IES) de hoy. Así, podemos traer a colación la frase de Vessuri, citada por Horn *et al*. (2024): "la academia va al mercado", que evidencia de forma resumida el hecho y la importancia del papel actual de las IES y el sector productivo en el contexto de la economía de mercado. Así, puede reconocerse que en la actualidad predomina una visión técnica, de carácter funcionalista en la percepción de la pertinencia de la educación superior.

Este contexto nos lleva a las reflexiones de Avendaño y Parada-Trujillo (2013), quienes —desde principios del presente siglo— vienen planteando la necesidad de transformar los currículos en la educación superior, apuntando a la sustentabilidad. Así mismo, desde una perspectiva un poco más profunda en contexto, Uddin *et al*. (2023) plantean una nueva visión del futuro, al referir que la educación agrícola superior debe estar sustentada en las políticas generales de calidad e innovación, en congruencia con su naturaleza académica, así como su pertinencia en relación con las necesidades del sector real (medio rural, justicia social y humanismo), un punto de vista que es retomado posteriormente por Jérôme (2024).

Después de contextualizar el tema que nos ocupa, a continuación se plantean cuatro preguntas, cuyas respuestas, de una u otra forma, guían nuestro análisis: 1) ¿cuáles son las variables que podrían producir los diferentes tipos de escenarios para el desarrollo institucional de la educación superior; 2) ¿por qué es preciso reestructurar la oferta de educación agrícola superior en torno a la formación tecnológico-compleja, tanto en el ámbito político como de la sociedad en América Latina?; 3) ¿cuáles son las competencias requeridas en la formación y capacitación de investigadores(as) desde un paradigma tecnológico complejo?, y 4) ¿cómo se debe repensar el modelo educativo actual a nivel superior en América Latina, para transitar del uso racional de recursos naturales y humanos hacia otro, a partir de un futuro sostenible en torno a la educación ambiental?

Época de cambio o cambio de época en la educación superior

Al realizar un análisis retrospectivo de la educación agrícola superior, es común encontrar que esta sienta sus orígenes en las ciencias naturales y, como tal, se remonte a la existencia en el planeta, ello dado que, desde sus inicios, el hombre se vio obligado a depender de los recursos de la naturaleza como vía única de supervivencia. Saldaña-Duque, *et al*. (2024) consideran este momento histórico como el origen de la cultura, por el cuidado y la preservación de las especies agrícolas.

Ahora bien, al analizar si estamos en presencia de una época de cambios o un cambio de época, podemos señalar que un nuevo mundo está emergiendo, partiendo de la coincidencia histórica que se ha venido mostrando entre tres procesos que, independientemente, se iniciaron a finales de los sesenta e inicios de los setenta (Santos, 2023). Estos procesos son: la revolución de las tecnologías de la información, la crisis económica simultánea de los modos de producción (capitalismo y estatismo) y el intento de ambos de reestructurarse para superarla, y, por último, la explosión internacional de movimientos sociales y culturales, destacando los movimientos ambientalistas, entre muchos otros. Así, evidentemente, los impactos de estas tres revoluciones (tecnológica, económica y sociocultural) están transformando de forma

estructural las relaciones de producción, de poder, así como la experiencia y la cultura de la sociedad, viéndose reflejadas en un cambio de concepción de la educación agrícola en la nueva época (Zickafoose, *et al*., 2023).

Necesidad de reestructurar la oferta de educación agrícola superior en torno a la formación tecnológico-compleja

Es una realidad que, por más de dos siglos, la organización del conocimiento en las IES ha sentado sus bases en las disciplinas, entendidas precisamente como una categoría organizacional del conocimiento que ha llevado a la humanidad a la división especializada del trabajo. Así, lo que hoy en día conocemos como disciplinas y especialización, según Jérôme (2024), se origina en la universidad napoleónica, sustentada en la parcelización del conocimiento y que prevalece en las escuelas de enseñanza y aprendizaje agrícola en el nivel superior. Al respecto, Zickafoose (2023) señala que, en el contexto del tercer milenio, caracterizado por la diversidad, los rápidos cambios científico-tecnológicos y la complejidad de los problemas sociales, las disciplinas resultan inoperantes para dar respuesta acertada a las diferentes problemáticas.

En su libro *Desarrollo curricular* y sus implicaciones para la docencia: tres estudios evaluativos sobre educación agrícola superior, Huffman (2003) enfatiza en el consenso que existe actualmente, tanto en el ámbito político como social, sobre la inminente necesidad de reestructurar la oferta de la educación agrícola superior y la formación tecnológico-compleja, de manera que puedan responder a las problemáticas reales de la sociedad. El autor añade además que la educación general y la formación tecnocientífica, efectivamente, están en mutación y requieren la atención permanente de la sociedad y los tomadores de decisiones. Así mismo, se evidencia la necesidad de la transdisciplina sobre la disciplina, toda vez que las diversas problemáticas del agro (mexicano, en su contexto, atreviéndome a decir que también del contexto global) se caracterizan por su complejidad e integralidad.

Competencias requeridas en la formación y capacitación de investigadores(as) desde un paradigma tecnológico complejo

Para hablar de las competencias requeridas en los diferentes procesos formativos, es necesario señalar, en concordancia con Tobón (2006), el evidente desplazamiento del sistema tradicional de calificaciones y titulaciones, el cual caracteriza en la práctica a la mayoría de las IES y está enfocado principalmente en una orientación científica, que se distingue por: 1) la separación de la docencia, la investigación, el servicio y la extensión; 2) los procesos con base en la explicación, la predicción y la comprensión de los hechos, y 3) el desarrollo teórico de realidades naturales y artificiales, y de ideas. Esto ha permitido, partiendo de una necesidad generada por la crisis formativa, que los sistemas educativos hayan comenzado a abrirse a áreas conducentes a la normalización del trabajo, la formación del individuo para el trabajo y la certificación laboral. Este nuevo enfoque, basado en la generación de competencias con una fuerte orientación tecnológico-compleja, se ha visto potenciado por la integración de la docencia, la gestión y la difusión de avances tecnológicos; la creación e innovación de prácticas sociales, y la satisfacción de necesidades reales (Norambuena-Meléndez, *et al*., 2023).

El anterior razonamiento nos lleva a entender que, en los procesos formativos, las IES deben centrar su atención en generar competencias que se complementen con servicios tecnológicos para el sector productivo y empresarial de su entorno socioeconómico, es decir, generar competencias en un contexto real. Así mismo, Daneshpour y Kwegyir-Afful (2021) señalan que con "la adquisición de aquellas competencias, que hoy son requeridas por los nuevos enfoques de gestión de la producción y el trabajo, permitirá formar —mediante procesos de aprendizaje basado en problemas (ABP)— a un individuo competente, capaz de entender los

problemas y relacionarse con el acelerado cambio tecnológico, innovador, así como de involucrarse en procesos de mejora continua. Evidentemente, ello solo se logrará si se enfocan dichas competencias de forma transdisciplinar, aplicables a diversos contextos de manera simultánea e incluyendo los componentes actitudinales y valorativos.

Repensando el modelo educativo actual a nivel superior en América Latina

Con respecto a la tecnociencia, tal como evidencia Norambuena-Meléndez, *et al*. (2023) en sus estudios, una tendencia marcada en las reflexiones prospectivas sobre la educación agrícola superior está dada por la necesidad de repensar el modelo educativo actual. Lo anterior se plantea desde la perspectiva del tránsito del uso racional de recursos naturales y humanos hacia otra, partiendo de un futuro sostenible en torno a la educación ambiental. La realidad de nuestro planeta hoy en día nos deja ver que estamos frente a una situación de emergencia, agudizada por contextos estrechamente relacionados, destacándose: la contaminación ambiental y la degradación de los ecosistemas, el agotamiento de recursos naturales, el desproporcional crecimiento de la población mundial, el desequilibrio de los ecosistemas, los conflictos sociales, así como la pérdida de la biodiversidad y cultural.

Variables que podrían producir los escenarios para el desarrollo institucional de la educación superior

Es necesario contemplar el agitado contexto global que determina a Latinoamérica. En esta medida, se observan variables estructurales que impactan de forma directa a los diferentes modelos de educación superior de la región. Así mismo, Udovychenko *et al*. (2022) acotan que la reestructuración geopolítica y geoeconómica, así como los procesos de integración y de globalización, son causa probable de la alteración del desarrollo de la educación superior, expresado como el fenómeno científico-tecnológico en todos sus ámbitos, incluyendo la educación agrícola superior. En este mismo contexto, el autor señala que, así como existen determinantes estructurales que inducen el cambio, deben tenerse en cuenta aquellas variables estructurales desde una prospectiva futurista para la educación en América Latina, destacando:

- Los procesos de globalización e integración regional
- El mercado como determinante del desarrollo educativo
- La inminente necesidad de un nuevo orden social y cultural
- Los procesos de evaluación y financiamiento institucional
- La necesidad de contar con procesos interactivos de planeación educativa
- El incremento de la competitividad como factor de éxito
- La articulación y vinculación entre las IES y el sector empresarial

En este marco, Saldaña-Duque *et al*. (2024) señalan que estas variables podrían producir tres escenarios: el mercado es el primero de ellos; el segundo está determinado por el desarrollo sustentable, y el tercero es el antidesarrollo. Este último es visto como un pronunciamiento temporal, hipotético y condicional, que estará determinado en el tiempo por la validez y la vigencia (Hartinger, *et al*. 2024), así como el vigor y la vitalidad de los pronunciamientos, con la posibilidad de que sus hipótesis se confirmen con el paso del tiempo y se cumplan las condiciones de estas.

Características del escenario deseable y posible de desarrollo institucional en América Latina

Desde una mirada futurista, Uddin *et al*. (2023) señalan —como la principal variable de futuro de la educación en México y Latinoamérica—

que es inminente el paso de una educación que se preocupa fundamentalmente por el valor formativo y social del conocimiento a otros modelos enfocados a la generación de valor económico y gerencial del conocimiento. Este tránsito está determinado principalmente por los cambios organizacionales del mercado de trabajo, la integración económica regional y global, la aparición de nuevos paradigmas tecnocientíficos, así como por procesos de desestatización y privatización de la educación en todos sus niveles. Lo anterior genera un marcado impacto en la educación superior, principalmente en temas relacionados con reelitización de la matrícula, diferenciación institucional, complejización organizativa e incremento de las desigualdades regionales (León & Madera, 2016). Así mismo, podrán encontrarse los siguientes escenarios:

- El escenario modernizador democrático-popular, determinando posiblemente la prolongación de la crisis (estructural generalizada).

- El escenario contextual céntrico, que sienta sus bases en un enfoque constructivista, donde el proyecto educativo, la filosofía institucional, su visión y misión, así como otros proyectos específicos, crean las condiciones para el replanteamiento de acciones de cambio en el sistema de educación. Lo anterior se basa en la autónoma universitaria y las relaciones de las IES con el Estado.

Dependencia de la manifestación de escenarios de desarrollo institucional para la educación agrícola superior

El trabajo de Bucio-Mendoza y Solís-Navarrete (2024) es la lectura base de nuestro análisis. En este entorno, los escenarios planteados anteriormente representan una propensión que dependerá seguramente de la forma como se organicen las IES en Latinoamérica; así mismo, de la manera como estas interpreten el contexto real y exploten sus fortalezas, así como de su proyección a través de la misión y visión institucional a corto, mediano y largo plazo. Otro elemento decisivo es la contención de estos elementos dentro del plan de desarrollo institucional, fundamentado en criterios de planeación estratégica y prospectiva. A su vez, dichos planes deben buscar la articulación equilibrada entre las diferentes esferas de poder u organización social, sin que ello implique la pérdida de su filosofía y compromiso social (Ferreyra *et al*., 2017).

Por otra parte, estas manifestaciones, bien articuladas a la historia de Latinoamérica y que permiten vislumbrar el escenario para el desarrollo institucional de las IES, muestran la realidad existente a finales del siglo pasado, con una proyección algo diferente a la de sus inicios. Lo anterior, so pena de que perduren algunos de los rasgos estructurales que definían y caracterizaban al continente, y que siguen siendo señales de identidad del "subdesarrollo latinoamericano" (Uriarte *et al*., 2025) y limitan aún la formación superior agrícola, como son:

- La incapacidad de crecimiento económico y la estabilidad a largo plazo.

- La fuerte desarticulación productiva (universidad-empresa-Estado), que lleva a la heterogeneidad permanente de la estructura sectorial y empresarial. Aquí, juega un rol determinante la ineficaz transferencia tecnológica o la insuficiente capacitación de la fuerza de laboral.

- La insondable dependencia tecnológica, comercial, financiera y cultural, que lleva a una vulnerabilidad de las relaciones externas y su constante desequilibrio, entre otros aspectos.

Conclusiones

A partir de las diferentes preguntas orientadoras y con el empleo de materiales que evidencian posturas teórico-prácticas aplicadas, el análisis ha dejado sobre la mesa varias posiciones sobre el papel de las tecnologías y la

necesidad de una urgente reforma curricular en la educación superior, en general, y, particularmente, en la educación agrícola superior, con un alto componente en la formación y el fortalecimiento de competencias. Esta última, con el empleo del ABP, permite fortalecer además el desarrollo de estrategias para la solución de problemas (es decir, permite que el estudiante relacione, que busque conexiones entre situaciones parecidas al problema), la adquisición de las bases y habilidades del conocimiento de ciertas disciplinas, la creatividad y la reflexión.

Referencias

Avendaño, W. R., & Parada-Trujillo, A. E. (2013). El currículo en la sociedad del conocimiento cognitiva. *Educación y Educadores, 16*(1), 159-174. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83428614008

Bucio-Mendoza, S., & Solís-Navarrete, J. A. (2024). Institutionalising social innovation in the Global South: Lessons learned. *Heliyon, 10*(20), e39556. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39556

Daneshpour, H., & Kwegyir-Afful, E. (2021). Analysing transdisciplinary education: A scoping review. *Science & Education, 31*(4), 1047-1074. https://doi.org/10.1007/s11191-021-00277-0

Ferreyra, M., Avitabile, C., Botero Álvarez, J., Haimovich Paz, F., & Urzúa, S. (2017). *Momento decisivo: la educación superior en América Latina y el Caribe*. Grupo Banco Mundial. https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/26489/211014ovSP.pdf

Gibbons, J. L., Eguigure-Fonseca, Z., Maier-Acosta, A., Menjívar-Flores, G. E., Vejarano-Moreno, I., & Alemán-Sierra, A. (2022). "There is nothing I cannot achieve": Empowering Latin American women through agricultural education. *Frontiers in Psychology, 13*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.902196

Hartinger, S. M., Palmeiro-Silva, Y. K., Llerena-Cayo, C., Blanco-Villafuerte, L., Escobar, L. E., Diaz, A., Sarmiento, J. H., Lescano, A. G., Melo, O., Rojas-Rueda, D., Takahashi, B., Callaghan, M., Chesini, F., Dasgupta, S., Gil Posse, C., Gouveia, N., Martins de Carvalho, A., Miranda-Chacón, Z., Mohajeri, N., Pantoja, C., (…), & Romanello, M. (2024). The 2023 Latin America report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for health-centred climate-resilient development. *The Lancet Regional Health - Americas, 33*. https://doi.org/10.1016/j.lana.2024.100746

Horn, A., Visser, M. W., Pittens, C. A. C. M., Urias, E., Zweekhorst, M. B. M., & van Dijk, G. M. (2024). Transdisciplinary learning trajectories: developing action and attitude in interplay. *Humanities and Social Sciences Communications, 11*. https://doi.org/10.1038/s41599-023-02541-w

Huffman Schwocho, D. (2003). *Desarrollo curricular y sus implicaciones para la docencia: tres estudios evaluativos sobre educación agrícola superior.* Universidad Autónoma Chapingo.

Jérôme, L. W. (2024). Making transdisciplinarity work for complex systems: A dynamic model for blending diverse knowledges. *Futures, 161*. https://doi.org/10.1016/j.tree.2024.03.XXX

León Robaina, R., & Madera Soriano, L. (2016). La internacionalización universitaria, un imperativo de la educación superior en el contexto latinoamericano actual. *Revista Encuentros, 14*(2), 43-59. doi: http://dx.doi.org/10.15665/re.v14i2.779

Norambuena-Meléndez, M., Guerrero, G. R., & González-Weil, C. (2023). What is meant by scientific literacy in the curriculum? A comparative analysis between Bolivia and

Chile. *Cultural Studies of Science Education, 18*, 937-958. https://doi.org/10.1007/s11422-023-10190-3

Saldaña-Duque, R., & Sánchez-Peña, A. L. (2024). Educación por competencias en la educación superior. Una mirada a las pedagogías y el desarrollo humano. *Sophia, 20*(2). https://doi.org/10.18634/sophiaj.20v.2i.1233

Santos, M. (2023). Towards interdisciplinarity with STEAM educational strategies: the Internet of Things as a catalyser to promote participatory citizenship. *Educational Media International, 60*. https://doi.org/10.1080/09523987.2023.2324581

Tobón S. (2006). *Formación basada en competencias* (2.a ed.). ECOE ediciones Ltda.

Uddin, I., Ahmad, M., Shahbaz, M., & Farooq, A. (2023). Enhancing institutional quality to boost economic development in developing nations: New insights from CS-ARDL approach. *Heliyon, 9*, e13723. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13723

Udovychenko, L., Pyatnitska-Pozdnyakova, I., Skliar, I., Pavliv, A., & Fonariuk, O. (2022). A transdisciplinary approach to teaching and building a higher education system. *Revista Eduweb, 16*(3). https://doi.org/10.46502/issn.1856-7576/2022.16.03.7

Uriarte, S., Baier-Fuentes, H., & Geldes, C. (2025). Ten Years of Sustainable Development Goals in Latin America and the Caribbean: A Review and Research Agenda. *Sustainability, 17*(17), 8084. https://doi.org/10.3390/su17178084

Zickafoose, A., Wingenbach, G., Baker, M., & Price, E. (2023). Developing Youth Agricultural Entrepreneurship in Latin America and the Caribbean. *Sustainability, 15*(22), 15983. https://doi.org/10.3390/su152215983

Instructivo para los autores

La *Revista de Investigaciones de Uniagraria* se dedica a difundir los resultados de investigaciones en diferentes campos del conocimiento y a promover el intercambio de opiniones que permitan fortalecer la misión y la visión institucional de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia (Uniagraria).

La revista es publicada anualmente por la Fundación Universitaria Agraria de Colombia (Uniagraria), por su Vicerrectoría de Investigación en Bogotá, Colombia.

Esta guía para autores contiene los lineamientos que se deben tener en cuenta para la preparación, la elaboración y el envío de artículos a la *Revista de Investigaciones de Uniagraria*, así como para la clasificación y aceptación de estos.

Orientación editorial

El contenido de los artículos debe estar dentro del marco de la misión y visión de la revista y cumplir con los criterios de originalidad, novedad y metodología. La *Revista de Investigaciones de Uniagraria* es una publicación multidisciplinaria, eminentemente científica y arbitrada que publica artículos de investigación, de reflexión, estudios de caso y revisiones bibliográficas que no hayan sido propuestas simultáneamente en otras revistas y cuya finalidad sea contribuir al avance del conocimiento en español, inglés y portugués. Los contenidos estarán siempre relacionados con las áreas ambientales y de la sostenibilidad, así como trabajos relacionados con el sector primario de la economía y el desarrollo rural. Se reserva el derecho de hacer las modificaciones de forma que el comité editorial considere necesarias.

La revista ha sido publicada ininterrumpidamente desde el año 2013 y se encuentra en proceso de indexación. Todo el material sometido a la revista para su publicación y aceptado por el comité editorial en atención a su calidad y pertinencia es sometido a arbitraje por pares expertos en los respectivos campos del saber. Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores y no de Uniagraria, ni de la revista, ni de las instituciones a las cuales pertenecen los firmantes.

Tipos de artículos publicables

Artículos de investigación científica y tecnológica. Documento que evidencia resultados originales derivados de un proyecto de investigación concluido. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resulta-dos y conclusiones.

Artículo de reflexión. Documento que evidencia resultados de un proyecto de investigación concluido, bajo una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor sobre un tema puntual.

Artículo de revisión. Documento resultante de una investigación terminada donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias en el campo de análisis. Se caracteriza por presentar una cuidadosa y metódica revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias citadas dentro del texto.

Artículo corto. Documento breve en el que se evidencian resultados originales, bien sean preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica.

Estudio de caso. Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación puntual para dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico. Debe incluir una revisión de literatura sobre casos análogos y apartados analíticos del caso.

Normas de colaboración, presentación y envío de artículos

Todo artículo enviado a la *Revista de Investigaciones de Uniagraria* será evaluado mediante un proceso de arbitraje anónimo por pares especialistas en el tema respectivo. Un artículo será aceptado si cuenta con dos evaluaciones positivas. Todos los trabajos deben ser originales e inéditos y no deben enviarse simultáneamente para su consideración a otras revistas.

La publicación del artículo implica la cesión total de los derechos de propiedad (*copyright*) a la *Revista de Investigaciones de Uniagraria*. La revista se reserva el derecho para la reproducción total o parcial del trabajo en otros medios impresos, electrónicos o cualquier otra alternativa, pero reconociendo siempre su autoría.

El artículo deberá ir acompañado de la **carta de presentación** y autoría. Dicho documento se enviará con la firma de todos los autores del trabajo.

Un artículo puede ser rechazado por un subcomité del comité editorial sin que se envíe a proceso de dictaminación cuando no sea congruente con los propósitos de la revista. Los trabajos escritos deficientemente, faltos de claridad, con errores gramaticales o que no cumplan con los requisitos de esta guía, tampoco serán considerados para ser evaluados. Los envíos deben hacerse electrónicamente al correo institucional: revistainvestigaciones@uniagraria.edu.co

Extensión del artículo y resumen

La extensión sugerida de los artículos será de cinco a nueve mil palabras; sin embargo, ningún artículo enviado podrá superar las diez mil palabras, incluyendo referencias bibliográficas.

Resumen: extensión entre 150 y 250 palabras en español y en inglés.

Palabras clave: de tres a cinco que identifiquen con certeza el contenido del artículo. Para cada texto se debe adjuntar la clasificación del *Journal of Economic Literature (JEL Classification)* según la temática que corresponda, de acuerdo con los códigos establecidos para búsquedas internacionales de producción bibliográfica (los códigos deben ser específicos y no ser más de tres). Esta clasificación se puede consultar en: http://www.aeaweb.org

Contenido del artículo

De acuerdo con los tipos de artículo, estos deberán incluir las siguientes partes: título en español; título en inglés; tipo de artículo, nombre del autor(es); información del autor; resumen; palabras clave; *abstract; keywords*; contenido del artículo; agradecimientos (opcional); conflictos de intereses (opcional); referencias bibliográficas y anexos.

El orden anterior debe seguirse en el documento. Las tablas y las figuras deben ubicarse a lo largo del contenido del artículo.

Los títulos van alineados siempre a la izquierda y en mayúsculas. Estos son los correspondientes a: título en español e inglés, nombre del autor, resumen, palabras clave, *abstract*, *keywords*, introducción, métodos, resultados, discusión, agradecimientos, conflictos de intereses, referencias bibliográficas y anexos. Los demás títulos y subtítulos van solo con la primera letra en mayúscula y alineados a la izquierda. Para los nombres de los autores el orden es: nombres, primer apellido y letra inicial del segundo apellido seguida de punto. Estos deben estar alineados a la derecha. Se respetará el nombre de pluma del autor, es decir, la forma habitual de los autores de separar los apellidos por un guion. El orden de los autores quedará como esté en el manuscrito enviado, entendiendo que el primero es el autor principal.

La información de los autores irá en nota de pie de página y con números arábigos consecutivos

se escribirán los siguientes datos de cada autor: profesión, grados académicos, filiación profesional (instituciones con las cuales está vinculado), ciudad, país, correo electrónico (del autor principal o de quien se encargue de la correspondencia).

Agradecimientos: si los autores consideran pertinente pueden incluir el nombre, la filiación y el tipo de apoyo ofrecido por los colaboradores en la realización del manuscrito, pero que no se catalogan como autores. Las personas nombradas tienen que haber expresado su consentimiento para ser mencionadas y el autor es responsable de la obtención del permiso escrito por parte de ellas.

Conflictos de interés: en el evento en que se presente este caso, se debe hacer una nota sobre las relaciones personales o institucionales que puedan incidir en la conducción, resultados o interpretación de estos.

Citas y notas al pie

Las referencias incluidas en el texto: deben reconocer el apellido del autor o autores y el año de publicación, por ejemplo: Stiglitz (2010), (Stiglitz, 2010) o (Stiglitz, 2010, p. 205). Las notas al pie deben incluirse al final de la página, secuenciadas en números arábigos y las referencias deben ir al final del texto.

Los autores: para siete autores o menos, nombrarlos a todos ellos; en caso de más de siete autores, colocar tres puntos tras el sexto y luego añadir el nombre del último autor. Es importante recordar que en castellano no se escribe una coma antes de la conjunción que completa la enumeración de autores.

Høglend, P., Bøgwald, K.---P., Amlo, S., Marble, A., Ulberg, R., Sjaastad, M. C., . . . Johansson, P. (2008). Transference interpretations in dynamic psychotherapy: Do they really yield sustained effects? *American Journal of Psychiatry*, 165, 763–771.

La lista de referencias: debe agregar la información completa sobre las fuentes respectivas, incluyendo el *DOI (Digital Object Indentifier)*, y esta se debe insertar al final del artículo, antes de cualquier apéndice. Los autores deben asegurarse de que haya una correspondencia estricta entre los nombres y los años reconocidos en el texto y aquellos listados en la bibliografía. Las referencias deben incluirse en orden alfabético, de acuerdo con el apellido del autor (o el nombre de cualquier organización si se trata de alguna fuente que no identifica a algún autor), siguiendo la norma de citación APA. También debe usarse párrafo francés justificado y deben presentarse de la siguiente forma:

Artículos

Shedler, J. (2010). The efficacy of psychodynamic psychotherapy. *American Psychologist, 65*, 98-109. DOI: 10.1037/a0018378

Martínez, M. y Venegas, F. (2014). Análisis del riesgo de mercado de los fondos de pensión en México: Un enfoque con modelos autorregresivos. *Contaduría y Administración, 59*(3), 165-195. DOI: 10.1016/s0186-1042(14)71269-0

En la ausencia del número del volumen o de la revista, por favor identificar el artículo mediante el periodo que cubre la publicación:

Fernández, I. (2015). Competencia en el sector aéreo y aeroportuario. *Revista de Administración Pública*, mayo-agosto(197), 91-132. DOI: 10.18042/cepc/ rap.197.03

Libros

Datar, S. y Rajan, M. (2018). H*orngren's Cost Accounting: A Managerial Emphasis.* Edimburgo: Pearson Education Limited. DOI: 10.4324/9780203079355

Versiones electrónicas de libros

Gonzalez-Mena, J. (2007). *Diversity in early care and education: Honoring differences.* Recuperado de http://mhprofessional. com/product. php?isbn=007722289X

Capítulos/artículos en libros

García, R. (2011). Tendencias y buenas prácticas en e-Administración; Calidad y atención al ciudadano; Eficiencia energética en la Administración Pública. En M. Arenilla Sáez (Coord.), *Crisis y Reforma de la Administración Pública.* (pp. 201- 346). España: Netbiblio. DOI: 10.4272/978-84-9745-516-9.ch2

Tesis/disertaciones

Castellanos, B. (2011). La crítica de Deleuze al psicoanálisis: El proyecto de un deseo políticamente constituyente (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Educación a Distancia, España. Recuperada de http://espacio.uned.es/fez/eserv/tesisuned:FilosofiaBcastellanos/Documento.pdf

Artículos de memorias, conferencias, documentos de investigación y de discusión

Bu, R. (2015). Study on International Trade Tax Competition Problems under Regional Economy. *2015 International Conference on Education Technology, Management and Humanities Science China (ETMHS 2015).* Atlantis Press. DOI: 10.2991/etmhs-15.2015.174

Thorleuchter, D., Van Den Poel, D. y Prinzie, A. (2010). Extracting Consumers Needs for New Products A Web Mining Approach, *Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Gong, M., ed.: 440-443.

Díaz, D. y Revuelta, J. (2009). Gasto público y crecimiento en América Latina y España: 1960-2000, Ponencia, *XVI Encuentro de Economía Pública, Universidad de Granada.* Granada, España.

Lamartina, S. y Zaghini, A. (2008). *Increasing Public Expenditures: Wagner's Law in OECD Countries, CFS Working Paper No. 2008/13,* Center for Financial Studies, University of Frankfurt.

Narayan, P., Nielsen, I. y Smyth, R. (2006). Panel data, cointegration, causality and *Wagner's Law: empirical evidence from Chinese provinces, Discussion Paper 01- 06,* Department of Economics, Monash University.

Artículos de periódico en línea

Hartmann, I. (14 de mayo del 2017). Breves y dinámicas, las psicoterapias que le disputan terreno al psicoanálisis. *Clarín*. Recuperado de https://www.clarin.com/suplementos/zona/brevesdinamicaspsicoterapiasdisputanterrenopsicoanalisis_0_ryP6vc7lZ.html

Medios audiovisuales

American Psychological Association (Productor). (2000). *Responding therapeutically to patient expressions of sexual attraction* [DVD]. Recuperado de http://www.apa.org/videos

Tablas, figuras, ecuaciones y cantidades

Tablas: las tablas deben explicarse por sí solas y no duplicar lo planteado en el texto, ya que su función es complementarlo o sustituirlo. La estructura de estas debe tener: tabla, número consecutivo según orden numérico, título, cuerpo, notas, títulos de columnas, filas y fuente de la tabla (cita del origen de la tabla). Las abreviaturas que se utilicen en los encabezados irán explicadas en nota de pie de la tabla y se identificarán exclusivamente con letras minúsculas en superíndice. Utilice

únicamente líneas horizontales para elaborar la tabla.

Citación de tablas: cada tabla será citada en el texto con un número arábigo consecutivo según el orden de aparición y entre paréntesis. Ejemplo: (tabla 1).

Los títulos de tablas deben ir secuenciados en números arábigos y deben encabezar la tabla en letra tipo Times New Roman y estar alineados a la izquierda. En la parte inferior se debe anotar la fuente con letra de 10 puntos.

En las tablas debe citarse la fuente (autor y año) con el siguiente formato: bordes (líneas) internos y sencillos, sin bordes izquierdo y derecho.

Figuras: corresponden a gráficos, fotos, mapas, esquemas, dibujos, diagramas y similares que se utilizan para ilustrar o ampliar la información, pero no para duplicarla. Cada figura debe tener su leyenda así: figura, número consecutivo según orden numérico, título, notas (opcional), fuente de la figura (cita del origen de la figura o derechos de autor).

Las figuras pueden ser elaboradas en Word, caso en el que hacen parte del escrito; estas también pueden ser insertadas en el documento, donde deben adjuntarse en archivo aparte.

Los archivos de las imágenes, debidamente identificados, deben cumplir con la característica de alta resolución para impresión (300 dpi), en formato jpg.

Citación de figuras: cada figura será citada en el texto en el orden en que aparezca, entre paréntesis. Ejemplo: (figura 1).

Los títulos de figuras deben ir secuenciados en números arábigos y deben colocarse en la parte inferior de la figura en letra tipo Times New Roman y estar alineados a la izquierda con letra de 10 puntos.

En las figuras debe citarse la fuente (autor y año) con el siguiente formato: bordes (líneas) internos y sencillos, sin bordes izquierdo y derecho, bordes suaves y las barras y las líneas en tonos grises.

Abreviaturas: cuando sea indispensable su uso, estas irán precedidas de su forma expandida completa y se colocarán entre paréntesis la primera vez que se utilicen. Se deben evitar las abreviaturas en el título y en el resumen.

Unidades de medida: las medidas de peso, altura, longitud y volumen se presentarán en unidades métricas (metro, kilogramo, litro, etc.). Se debe utilizar en todos los casos el sistema internacional de unidades, cuyas abreviaturas de las unidades de medida no tienen plural ni signos de puntuación. Decimales: se indicarán por medio de "," (comas).

Porcentajes: al ubicarlos se deja un espacio fino con respecto a los números. Ejemplo: 23,5 %.

Las ecuaciones deben enviarse en formato editable y en el texto deben ir centradas en renglón aparte y con su numeración entre paréntesis al margen derecho. Deben presentarse de forma que se permita su edición, no enviar como imágenes.

Las cantidades que se empleen deben presentarse de la siguiente forma: coma para separar decimales (24,75, 15,43 %) y un espacio para separar miles (678 945).

Las tablas, las figuras y las ecuaciones se presentarán en el texto y también se deberán enviar en un archivo por separado en formato editable.

Otros requisitos

El nombre o los nombres de los autores deben omitirse del cuerpo del artículo a fin de preservar su anonimato durante el proceso de arbitraje. En un archivo diferente debe incluirse la siguiente información: título del trabajo; nombre(s) del autor o autores; afiliación institucional;

dirección(es), número de teléfono fijo y celular, y dirección(es) electrónica(s). Debe identificarse al autor de contacto. Esta información no será conocida por los árbitros.

Copias para los autores

Cada autor recibirá una copia impresa. Se pueden obtener copias adicionales de los artículos (pdf) en la página web de la revista.

Carta de presentación y autoría

El texto completo del artículo se envía a la Revista de Investigaciones de Uniagraria en medio magnético, acompañado de una carta de presentación y autoría por parte del autor o autores que incluya los siguientes puntos:

- Nombre completo del artículo.
- Indicación de que los autores están de acuerdo con el contenido, la organización y la presentación del artículo.
- Declaración de que el artículo es original, que no se ha publicado con anterioridad y que no se va a presentar a otra revista nacional o internacional mientras esté en proceso de evaluación por parte del comité editorial de la *Revista de Investigaciones de Uniagraria.*
- Declaración de que los autores han respetado el derecho a la intimidad de las personas que participaron en la investigación, que han cumplido con normas éticas de experimentación con humanos o animales y que en los agradecimientos incluyeron a las personas, que, sin ser autores, participaron de forma especial en la realización del estudio.
- Indicación de que los autores no tienen conflictos de interés.
- Autorización a la *Revista de Investigaciones de Uniagraria* para reproducir el texto, las figuras o cualquier otro material que tenga reserva de derechos; para realizar ajustes en el contenido y estilo del artículo por parte de los revisores de inglés u otro idioma y de estilo.
- Indicación de cuál autor se encargará de recibir y enviar la correspondencia, de lo contrario se asumirá que el primer autor asumirá las funciones antes mencionadas.
- Inclusión del nombre completo (nombre y dos apellidos), documento de identificación y firma de todos los autores

La dirección de la revista es:

Revista de Investigaciones de Uniagraria, Vicerrectoría de Investigaciones, Fundación Universitaria Agraria de Colombia (Uniagraria), Calle 171 No. 54C-16, Bogotá, Colombia. Correo electrónico:

revistainvestigaciones@uniagraria.edu.co o a ruiz.juan@uniagraria.edu.co

Revista de Investigaciones de la Fundación Universitaria
Agraria de Colombia -UNIAGRARIA- Bogotá D.C. - Colombia
2025

Editorial 5
Andrés Polo

Determinantes logísticos de la gestión de la sostenibilidad de los activos turísticos en Sabana Occidente, Cundinamarca
David Arturo Conto-López 7

Diseño viable y resiliente de la cadena de suministro de panela: un estudio con dinámica de sistemas
Carlos Javier Guerrero-Useda, Jeysser Johan Otero Díaz, Andrés Polo Roa 19

Identificación taxonómica no destructiva de *ammonites* del Cenomaniano-Coniaciano en Colombia mediante inteligencia artificial y aprendizaje profundo
Javier García-Guerrero, Ricardo Antonio Tobón 41

Planificación inicial de redes de CCUS en Colombia asistida por IA: un marco geoespacial-generativo
Andrés Polo 55

Optimización de rutas asistida cuánticamente para la exploración geológica marina con UAV
David Rojas-Arciniegas 74

Territorio y emprendimiento familiar en Chía, Colombia: desafíos de la informalidad, la viabilidad y la equidad de género en áreas rurales
Segundo Leonardo Cortés-López 93

Repensar la educación agrícola superior desde la tecnociencia y la reestructuración curricular
Deivis Suárez-Rivero, Olga Marín-Mahecha, Mauricio A. Sierra-Sarmiento, Edith Patricia Sánchez-Quiñonez, Valentina Arévalo-Marín, Maikel Suárez-Rivero 109

Instructivo para los autores 117

UNIAGRARIA
Fundación Universitaria Agraria de Colombia
LA U VERDE DE COLOMBIA

Sede Principal: Calle 170 No. 54A-10
Bogotá - Colombia
PBX: 6671515
informes@UNIAGRARIA.edu.co