

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

Andrés Polo¹



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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂, 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 CO₂ 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 CO₂

La aplicación de métodos de aprendizaje automático (ML) en el ámbito de CCUS se ha intensificado, con el objetivo de pronosticar emisiones de CO₂, 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂, 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 CO₂ 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 CO₂, 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 CO₂. 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂, 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 CO₂ 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 decisonal y la apropiación institucional, una brecha frecuentemente señalada en estudios tecnoeconómicos de CCUS (Hanson *et al.*, 2025; Moiola *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 CO₂ 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., Belgiorio, 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 CO₂ emissions. *Results in Surfaces and Interfaces*, 18, 100381. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100381>
- Hosseinfard, 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. *Geoenery 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., Véhot, 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.jobbe.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>