



**Integración de la inteligencia artificial geoespacial en la gobernanza: revisión bibliográfica
y perspectivas para Colombia**

Johan Sebastian León Morales

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesor

John Fernando Escobar Martínez, Doctor (PhD) en Ingenierías

Universidad de Antioquía

Facultad de Ingeniería

Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	León Morales [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] J, S. León Morales, “Integración de la inteligencia artificial geoespacial en la gobernanza: revisión bibliográfica y perspectivas para Colombia”, Trabajo de grado especialización, Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.



Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática, Cohorte XIX.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi amada familia, pilar fundamental en cada paso de este camino. En especial, a mi madre, quien con su amor incondicional, fortaleza y sabias palabras fue una luz en los momentos de incertidumbre y un motor para la consecución de este sueño. También dedico este trabajo a todas aquellas personas que, con sus gestos, palabras y apoyo, dejaron huella en mi vida y contribuyeron a alcanzar este objetivo

Agradecimientos

Agradezco al doctor John Fernando Escobar Martínez por su disposición y apoyo en la revisión y aprobación de este trabajo. También extendo mi gratitud a los profesores de la especialización, cuyas enseñanzas y guía fueron esenciales para alcanzar este logro.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. OBJETIVOS	10
A. Objetivo general	10
B. Objetivos específicos	10
III. METODOLOGÍA	11
A. Selección De Literatura	11
Búsqueda en Bases de Datos Bibliográficas	11
Revisión y Depuración de Investigaciones	12
B. Análisis del Contenido de la Literatura	13
Análisis Sistémico con ProKnow-C.....	13
Identificación de Tendencias, Modelos, Aplicaciones y Desafíos Éticos.....	13
Análisis de las Oportunidades.....	14
IV. RESULTADOS	15
Tendencias y aplicaciones	15
Retos y desafíos.....	17
Oportunidades	19
Oportunidades y desafíos en Colombia.....	21
V. CONCLUSIONES.....	24
VI. RECOMENDACIONES	25
REFERENCIAS	27

LISTA DE TABLAS

TABLA I. CANTIDAD DE ARTICULOS IDENTIFICADOS12

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Metodología13

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

GeoAI	Inteligencia Artificial Geoespacial
AI	Inteligencia Artificial
XAI	Inteligencia Artificial Explicable
SIG	Sistemas de Información Geográfica
GANs	Redes generativas Antagónicas
ICT	Tecnologías de la Información y la Comunicación
LLMs	Modelos de Lenguaje Grande
LLM-Geo	Modelos de Lenguaje Grande para Datos Geoespaciales
UDT	Gemelos Digitales
LSTM	Long Short-Term Memory
CNN	Convolutional Neural Networks

RESUMEN

La integración de la inteligencia artificial geoespacial (GeoAI) en la gobernanza ha emergido como una herramienta clave para la modernización de la gestión territorial y la toma de decisiones en países en desarrollo como Colombia. Este estudio tiene como objetivo analizar la adopción de GeoAI en la gobernanza colombiana mediante una revisión exhaustiva de la literatura reciente. La metodología empleada incluye la búsqueda en bases de datos académicas, la depuración de investigaciones y el análisis sistémico de contenido utilizando ProKnow-C. Los resultados evidencian que GeoAI ofrece oportunidades significativas para optimizar la gestión de recursos, la planificación urbana y la respuesta ante desastres naturales, aunque enfrenta desafíos relacionados con la infraestructura tecnológica, la equidad en el acceso y la ética de los datos. El estudio concluye que, para maximizar el potencial de GeoAI en Colombia, es fundamental desarrollar capacidades locales, fortalecer la infraestructura tecnológica y establecer marcos regulatorios claros que garanticen la transparencia y la equidad en la toma de decisiones.

Palabras clave — Inteligencia Artificial Geoespacial, Gobernanza, Colombia, Gestión Territorial, Ética de Datos.

ABSTRACT

Geospatial artificial intelligence (GeoAI) has become a vital tool for modernizing governance, particularly in developing countries like Colombia. This study aims to explore the integration of GeoAI into Colombian governance through a comprehensive review of recent literature. The methodology involves a systematic selection of academic publications, data refinement, and content analysis using ProKnow-C. The findings highlight that GeoAI provides significant opportunities for enhancing resource management, urban planning, and disaster response, while facing challenges related to technological infrastructure, equitable access, and data ethics. The study concludes that maximizing GeoAI's potential in Colombia requires developing local capacities, enhancing technological infrastructure, and establishing clear regulatory frameworks to ensure transparency and equity in decision-making processes.

Keywords — Geospatial Artificial Intelligence, Governance, Colombia, Territorial Management, Data Ethics.

I. INTRODUCCIÓN

En la última década, la inteligencia artificial geoespacial (GeoAI) ha emergido como una disciplina clave para la gestión y análisis de datos espaciales. Su capacidad de integrar tecnologías avanzadas con grandes volúmenes de datos georreferenciados la convierte en una herramienta estratégica para enfrentar desafíos complejos, como la planificación urbana, la gestión territorial y la conservación ambiental. A nivel global, GeoAI ha mostrado su eficacia al optimizar procesos y mejorar la precisión en la toma de decisiones, brindando soluciones innovadoras en contextos críticos. Sin embargo, su adopción en países en desarrollo, como Colombia, enfrenta importantes desafíos estructurales, éticos y tecnológicos.

Colombia, por su diversidad geográfica y sus complejas dinámicas sociales, políticas y económicas, ofrece un contexto único para el análisis de las aplicaciones de GeoAI. Esta tecnología tiene el potencial de transformar la gestión pública mediante el fortalecimiento de la planificación territorial, la mejora en la administración de recursos y el aumento de la eficiencia en la prestación de servicios. No obstante, las limitaciones en infraestructura tecnológica, la formación de talento humano especializado y los vacíos en la gobernanza de datos representan barreras significativas para su implementación.

Desde una perspectiva ética, el uso de GeoAI plantea interrogantes sobre la privacidad de los datos, la equidad en el acceso y la transparencia en los procesos de decisión automatizados. Esto subraya la necesidad de desarrollar marcos regulatorios robustos que aseguren la protección de derechos ciudadanos y fomenten una adopción inclusiva de estas tecnologías.

En este marco, el presente estudio se centra en analizar la integración de GeoAI en la gobernanza colombiana. A través de una revisión exhaustiva de la literatura científica reciente, busca identificar tendencias globales, avances metodológicos y desafíos locales, con el fin de contextualizar el potencial de esta tecnología para responder a las necesidades de desarrollo sostenible del país.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Analizar la integración de la inteligencia artificial geoespacial (GeoAI) en la gobernanza de Colombia, a través de una revisión bibliográfica de los avances recientes.

B. Objetivos específicos

- Identificar tendencias globales y avances recientes en la integración de la inteligencia artificial geoespacial (GeoAI) a través de una revisión exhaustiva de la literatura.
- Examinar casos de estudio relevantes a nivel mundial que demuestren la aplicación y efectividad de GeoAI en diferentes áreas, incluyendo gobernanza, medio ambiente, infraestructura y otros campos.
- Explorar las perspectivas actuales y los desafíos futuros en la adopción y aplicación de GeoAI de la gobernanza en Colombia.

III. METODOLOGÍA

La metodología adoptada en esta investigación se estructuró en dos etapas principales: selección de literatura y análisis del contenido. Cada etapa se describe a continuación de manera detallada, destacando los enfoques utilizados para garantizar el rigor académico y la relevancia de los resultados.

A. Selección De Literatura

Búsqueda en Bases de Datos Bibliográficas

Se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva en seis bases de datos bibliográficas reconocidas, seleccionadas por su relevancia y cobertura en el ámbito de la inteligencia artificial y las ciencias geoespaciales. Las bases consultadas fueron:

- Taylor & Francis
- ScienceDirect
- Science.gov
- Scopus
- SpringerLink
- IEEE Xplore

La búsqueda se realizó utilizando el término clave "GeoAI", delimitando el periodo a partir del año 2022 para garantizar la incorporación de los avances más recientes en el campo. Esta delimitación temporal responde al rápido desarrollo tecnológico y la creciente aplicación de la GeoAI en múltiples disciplinas.

Los resultados iniciales de la búsqueda arrojaron un total de 521 publicaciones, distribuidas según se muestra en la siguiente tabla:

TABLA I.
CANTIDAD DE ARTICULOS IDENTIFICADOS

Revista	Cantidad de investigaciones
IEEE Xplore	27
Science	49
ScienceDirect	124
Scopus	200
SpringerLink	80
Taylor & Francis	41
Total	521

Revisión y Depuración de Investigaciones

Para garantizar la relevancia y calidad de los estudios incluidos, se implementó un proceso riguroso de revisión y depuración que comprendió las siguientes etapas:

- A. Eliminación de artículos duplicados.
- B. Revisión preliminar de títulos y resúmenes para descartar aquellos que no se ajustaban al objetivo central de la investigación.
- C. Evaluación automatizada mediante herramientas de inteligencia artificial, con el propósito de identificar publicaciones de alta calidad metodológica y pertinencia temática.
- D. Lectura detallada de los estudios seleccionados, asegurando su profundidad y relevancia en relación con los objetivos planteados.

Como resultado de este proceso, se seleccionaron 36 estudios que cumplen con los criterios establecidos y aportan significativamente al desarrollo del objetivo de la presente investigación.

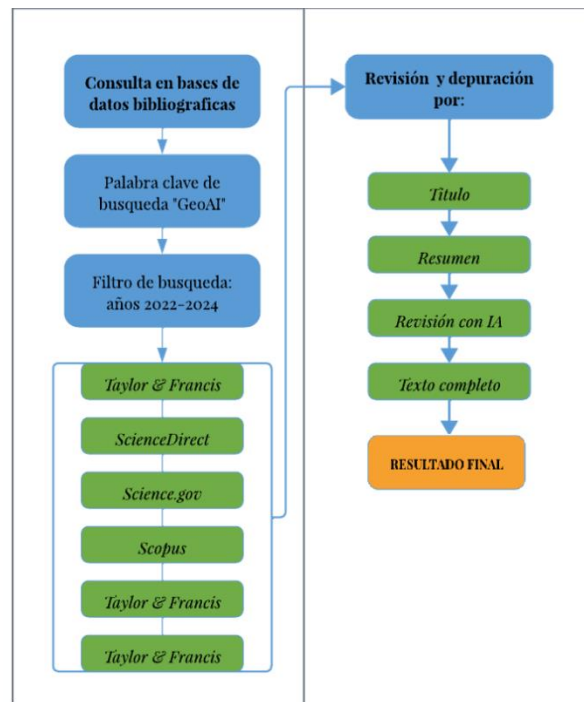


Fig. 1. Metodología

B. Análisis del Contenido de la Literatura

Análisis Sistémico con ProKnow-C

El análisis del contenido se llevó a cabo utilizando la metodología ProKnow-C (Knowledge Development Process – Constructivist), reconocida por su enfoque estructurado y sistemático en la construcción del conocimiento. Esta herramienta permitió:

- Identificar las investigaciones más relevantes y de alta calidad.
- Clasificar las tendencias, modelos, aplicaciones y desafíos éticos asociados al uso de GeoAI, con un enfoque particular en su relación con la gobernanza.

Identificación de Tendencias, Modelos, Aplicaciones y Desafíos Éticos

El análisis permitió estructurar la información obtenida en categorías clave, como:

- Tendencias actuales: desarrollo y aplicación de GeoAI a nivel global.
- Modelos predominantes: enfoques técnicos y metodológicos utilizados en los estudios.

- Principales aplicaciones: áreas específicas en las que GeoAI ha demostrado su utilidad, incluyendo la gestión territorial y la planificación urbana.
- Desafíos éticos: implicaciones en privacidad, transparencia y gobernabilidad.

Análisis de las Oportunidades

Se realizó un análisis integral de las posibilidades que GeoAI ofrece para fortalecer la gobernanza en Colombia, con énfasis en áreas de aplicación, beneficios previstos y su impacto en la toma de decisiones y la eficiencia administrativa.

IV. RESULTADOS

Tendencias y aplicaciones

En los últimos años, la GeoAI ha ganado una relevancia creciente debido a sus diversas aplicaciones en múltiples campos, como el social, económico y ambiental. Estas herramientas permiten procesar grandes volúmenes de datos de manera eficiente, identificar patrones y relaciones en datos geoespaciales, así como realizar predicciones y análisis de tendencias. Todo esto contribuye a abordar problemas complejos y facilita la toma de decisiones en áreas como la planificación urbana, la gestión de recursos naturales [1], la salud urbana [2], la respuesta ante emergencias y desastres, la participación ciudadana en la toma de decisiones, la evaluación de políticas públicas [3], la identificación de zonas de pobreza en comunidades rurales, y la localización de áreas óptimas para el desarrollo económico [4].

Además, la GeoAI ha transformado la automatización en la creación, diseño y evaluación de mapas [5][6]. Herramientas como las redes neuronales y las GANs han mejorado significativamente la eficiencia en el análisis de datos geoespaciales, facilitando la simplificación y abstracción de detalles geográficos, la automatización de estilos cartográficos, la extracción de características geográficas y la generación automatizada de mapas a partir de imágenes satelitales [7].

Uno de los sectores donde la GeoAI ha mostrado un impacto significativo es en la planificación urbana. Ouchra et al. [8] señalan que los avances en GeoAI ofrecen soluciones innovadoras para enfrentar los desafíos del crecimiento urbano y la gestión eficiente de recursos, promoviendo el desarrollo sostenible y enriqueciendo el conocimiento académico. Marasinghe et al. [9] destacan el papel crucial de la visión por computadora (Computer Vision) como una herramienta esencial para analizar grandes volúmenes de datos urbanos, permitiendo la visualización de movimientos y cambios en el entorno urbano. Esta capacidad de modelar y simular escenarios futuros resulta vital para tomar decisiones más informadas en el ámbito de la planificación urbana. Un enfoque similar es adoptado por Son et al. [10] que no solo destacan la eficiencia de las herramientas de IA en este campo, sino que también propone estrategias para reducir la brecha entre la teoría y la práctica. Estas incluyen el aprendizaje a partir de experiencias

previas, tanto de casos exitosos como de fracasos en la aplicación de políticas urbanas, y la promoción de un trabajo interdisciplinario entre las partes involucradas.

En 2024, Bibiri et al. [11] y Janarthanan y Manimaram [12] analizan cómo la inteligencia artificial, y en particular los UDT contribuyen a la planificación de ciudades sostenibles, procesando grandes volúmenes de datos en tiempo real. Esto permite no solo maximizar la eficiencia en el uso de los recursos disponibles, sino también simular diversos escenarios para minimizar los efectos negativos de las decisiones de planificación, favoreciendo la creación de políticas urbanas más efectivas y participativas.

Por su parte, Mortaheb y Jankowski [13] subrayan la importancia de adoptar el concepto de "ciudad inteligente" desde un enfoque centrado en el ser humano, que integre las necesidades sociales y económicas en un diseño urbano más eficiente, al tiempo que identifica patrones de comportamiento y zonas de vulnerabilidad. Gaglione [14] destaca que en Europa se busca abordar los retos urbanos mediante tecnologías y big data, acuñando a términos de ciudades inteligentes mediante seis características clave: economía, personas, gobernanza, movilidad, medio ambiente y calidad de vida, y para esto, el autor destaca la importancia de involucrar a los ciudadanos en la toma de decisiones mediante tecnologías como ICT, de generar estrategias de gobernanza enfocadas en armonizar las políticas nacionales con las necesidades locales, de integrar estrategias sostenibles y fomentar la cooperación entre ciudades para abordar desafíos de cambio climático y de enfatizar en la gobernanza de datos.

A la luz de la creciente integración de la GeoAI en la planificación de territorios inteligentes y sostenibles, es relevante considerar la visión de Wang et al. [15] quienes subrayan la importancia de un análisis geográfico urbano integral. Este enfoque no solo debe abordar las relaciones físicas entre las personas y su entorno, sino también las dinámicas culturales, económicas, políticas y sociales. Al adoptar esta perspectiva holística, se mejora la toma de decisiones al tener en cuenta no solo los aspectos físicos, sino también los comportamientos humanos y las interacciones socioeconómicas, lo que facilita la formulación de políticas públicas más inclusivas y efectivas. La geografía urbana juega un papel clave en este punto, ya que permite la identificación de patrones y tendencias en el desarrollo urbano, la creación de modelos predictivos sobre cambios en la dinámica de la ciudad, el crecimiento poblacional, el uso del suelo y la movilidad. Además, facilita el análisis de la diferenciación social en distintas áreas, permitiendo estudiar características

socioeconómicas y demográficas a través de herramientas como el “Sensing social”, que integra datos interdisciplinarios desde múltiples perspectivas [16].

Además de la planificación urbana, las GeoAI están ganando terreno en áreas como la modelación hidrológica y fluvial. Gonzales-Inca et al. [17] examinan diversas aplicaciones de la GeoAI en la modelación de caudales, la calibración de modelos hidrológicos existentes, la evaluación y predicción de la calidad del agua, y el mapeo de la geomorfología fluvial. Estas aplicaciones permiten una evaluación más precisa de los procesos y cambios morfodinámicos, lo que facilita la predicción de eventos extremos, como inundaciones, y mejora la capacidad de respuesta ante desastres naturales.

Incluso, las GeoAI también han logrado identificar patrones de salud en diferentes poblaciones, han modelado la propagación de enfermedades y han optimizado la distribución de recursos de salud, basándose en la ubicación de la población y las necesidades de atención médica [2]. Chen [1] relata algunos modelos aplicados a la predicción de epidemias urbanas y al análisis de salud ambiental urbana; en el primero se utiliza un modelo de LSTM para capturar la dinámica temporal de las epidemias de influenza estacional, considerando variables externas como la proximidad geográfica y factores climáticos (humedad, temperatura, precipitación y exposición a la luz solar). Además, se extraen datos de interacción en redes sociales, como mensajes de Twitter y búsquedas en Google relacionadas con la influenza, para estimar el riesgo de influenza en regiones específicas; en el segundo se utiliza el modelo CNN para evaluar la relación entre el entorno construido y la prevalencia local de la obesidad. Este análisis demuestra que las tasas de obesidad están asociadas con características físicas del vecindario, como la proximidad a carreteras y la cantidad de áreas verdes. También se identifican variables que pueden estar directamente relacionadas con hábitos alimenticios y de ejercicio.

Retos y desafíos

La integración de las tecnologías de GeoAI ha generado un impacto significativo en el análisis de datos geoespaciales y la modelación de escenarios complejos, posicionándose como herramientas innovadoras y eficientes. Sin embargo, su uso presenta una serie de desafíos, especialmente debido al vasto volumen de datos que manejan, generando sesgos en la información o resultados que no reflejan los productos esperados.

Inicialmente, la gran cantidad de datos generados presenta dificultades en términos de almacenamiento, procesamiento, integración, precisión e interpretabilidad de los modelos, lo que requiere la integración de diversas herramientas y enfoques interdisciplinarios [18]. Además, existen preocupaciones sobre la falta de explicabilidad de los modelos de IA, los sesgos en los datos geoespaciales y la incertidumbre en las predicciones, lo que podría comprometer la toma de decisiones fundamentadas en GeoAI [2]. Asimismo, el uso de la AI en la generación de mapas puede presentar problemas como inexactitudes, información engañosa y la introducción de elementos inesperados que dificultan la replicabilidad de los resultados [19]. Una problemática similar se observa en el uso de ChatGPT, que, aunque es capaz de generar respuestas plausibles, puede proporcionar información incorrecta en ausencia de datos suficientes, lo que plantea dudas sobre la precisión y la confianza en sus aplicaciones, especialmente en contextos como la planificación urbana o la gestión de desastres, donde las decisiones basadas en IA pueden tener un impacto significativo [20].

Las herramientas de Inteligencia Artificial como los LLMs también presentan desafíos importantes como la falta de consistencia en las respuestas, la dificultad para explicar los resultados y la posible exposición de datos sensibles [21]. Li y Ning [22] mencionan que herramientas como LLM-Geo, que realizan análisis complejos y recopilan datos automáticamente para generar visualizaciones sin intervención humana, aún enfrentan limitaciones debido a la falta de componentes clave, como el registro de operaciones y la validación de código.

La aplicación de herramientas de GeoAI plantea desafíos éticos y sociales significativos. Un aspecto fundamental es la preocupación por la privacidad y la protección de los datos, ya que la recopilación masiva de datos puede involucrar información personal de los usuarios, estos pueden aprender y divulgar información personal sensible como direcciones residenciales o preferencias de ubicación, y que en muchas ocasiones son sin consentimiento [23], especialmente en contextos de vigilancia, lo que requiere un manejo responsable y transparente. Además, es crucial analizar los impactos potenciales de las decisiones basadas en GeoAI sobre comunidades vulnerables y marginadas, para evitar que refuercen desigualdades preexistentes [24] ya que los datos utilizados en su entrenamiento pueden reflejar prejuicios históricos o discriminatorios [23] dejando a comunidades vulnerables fuera de la toma de decisiones. Otro desafío importante son los posibles impactos ambientales asociados al uso intensivo de recursos computacionales en el entrenamiento de modelos avanzados, como los modelos fundacionales de IA [25]. Además, la

opacidad en los algoritmos y las decisiones automatizadas dificulta que los usuarios comprendan cómo se utilizan los datos y qué impacto tienen, lo que plantea la preocupación de que no haya una responsabilidad clara cuando las decisiones tomadas a partir de estos modelos generen efectos negativos [26]. Zhang y Zhu [5] señalan que también existe un desafío relacionado con el acceso desigual a la tecnología, ya que no todas las regiones o comunidades tienen acceso a las herramientas necesarias para utilizar GeoAI, lo que podría profundizar la brecha digital. Además, la automatización en tareas como la cartografía podría generar pérdida de empleos en sectores tradicionales.

Otro desafío que enfrentan las nuevas tecnologías es su mal uso, estos modelos pueden ser utilizados de manera maliciosa, como la creación de prompts o uso indebido de herramientas geoespaciales. Esto aunado con la falta de regulaciones adecuadas y supervisión en el uso de estas herramientas, suponen un riesgo para la seguridad y bienestar social [23].

Oportunidades

Con base en los retos y desafíos presentados, en los estudios se ha analizado la manera de darles manejo y solución, principalmente a aquellos que están relacionados con sesgos en la información, resultados erróneos, interpretabilidad y privacidad y transparencia en la información.

En respuesta a la falta de explicabilidad en los modelos de IA, ha surgido la Inteligencia Artificial Explicable (XAI), que busca mejorar la interpretabilidad de los modelos proporcionando explicaciones claras sobre cómo y por qué se toman ciertas decisiones dentro de estos. Según Xing y Sieber [27], la XAI no solo se basa en métricas estadísticas, sino que también tiene en cuenta las necesidades y el contexto de los usuarios, lo que mejora la confianza en la toma de decisiones basadas en IA. La XAI busca involucrar a los usuarios en la interpretación de los modelos y adaptarse a los contextos geográficos y sociales específicos, un reto fundamental en la utilización de IA para la toma de decisiones en áreas como la planificación urbana y la gestión de recursos.

Dado el complejo panorama de desafíos que enfrenta la implementación de GeoAI, es imperativo establecer estándares rigurosos para asegurar que los sistemas no generen resultados sesgados o erróneos, especialmente en contextos donde los análisis geoespaciales tienen un impacto directo en las políticas públicas o en las comunidades vulnerables [22]. En este sentido, Scheider y Richter [28] proponen un modelo pragmático que enfatice la conceptualización y la

interpretación de los datos geográficos, reconociendo la importancia del conocimiento y la experiencia humana en el proceso de interpretación. Por su parte Arundel et al. [29], proponen realizar una estandarización universal, que se aplique los mismos estándares para formatos y métricas de evaluación, también la interoperabilidad semántica para mejorar la integración de datos y manejar un enfoque hacia la ética, la equidad y la privacidad.

Por otro lado, Kang et al. [7] desarrollaron un detector para evaluar la confiabilidad de los mapas generados por inteligencia artificial, con el objetivo de abordar los desafíos éticos relacionados con la toma de decisiones basadas en la interpretabilidad de estos mapas. Este detector no solo busca verificar la precisión de los datos proporcionados por los mapas generados por IA, sino también educar a los usuarios sobre las implicaciones éticas y sociales que pueden surgir, promoviendo un trabajo colaborativo entre expertos para producir mapas de alta calidad y confiabilidad.

En el estudio de Hu et al. [30] proponen enriquecer los metadatos asociados a las imágenes de mapas con metadatos más detallados y precisos, los usuarios pueden realizar búsquedas más efectivas en bases de datos y geoportales, mejorar la organización y clasificación de imágenes cartográficas, facilitar la integración con SIG, y optimizar el análisis y la visualización de datos. Esta estrategia no solo mejora la gestión de la información, sino que también fomenta la colaboración interdisciplinaria, lo que permite un intercambio más eficiente de recursos e información.

Por su parte, Oluoch [26] sugiere diversas estrategias para abordar los desafíos éticos, como la creación de marcos de gobernanza de datos que garanticen la responsabilidad y transparencia en la recolección, almacenamiento y uso de datos, así como el desarrollo de normativas regionales e internacionales adaptadas a los contextos locales. Además, enfatiza la necesidad de establecer controles institucionales para regular y auditar el uso de tecnologías avanzadas como la GeoAI. Rao et al. [23] también mencionan algunas propuestas para el adecuado manejo de las GeoAI: el uso de técnicas como geomasking, anonimización diferencial y protección multimodal, con el fin de proteger la privacidad de datos geoespaciales, la adopción de estrategias como aprendizaje federado, codificación eficiente y descentralización para evitar riesgos asociados al entrenamiento y servicio centralizado, el establecimiento de protocolos genéricos para conectar herramientas geoespaciales externas con los modelos de manera controlada y segura, el desarrollo de detectores

genéricos para filtrar prompts maliciosos y prevenir fugas de información sensible y la implementación de medidas para identificar y mitigar retroalimentaciones envenenadas como el monitoreo continuo de las curvas de recompensa y la evaluación del comportamiento del modelo.

Todo esto resalta la necesidad de mejorar la adaptabilidad de estas herramientas, incorporar sistemas de memoria, permitir la exploración de datos geoespaciales en línea, desarrollar modelos espaciales de mayor escala e incrementar la capacidad para responder preguntas complejas en análisis geográficos.

Oportunidades y desafíos en Colombia

La implementación de la inteligencia artificial geoespacial (GeoAI) en Colombia se presenta como una herramienta clave para enfrentar algunos de los desafíos más complejos del país, desde la gestión de sus recursos naturales hasta la modernización de la administración pública. En un territorio caracterizado por su diversidad geográfica y su compleja dinámica social, económica y política, la GeoAI tiene el potencial de transformar la manera en que se gestionan las políticas públicas, los recursos y la planificación territorial, permitiendo avances significativos en áreas prioritarias para el desarrollo nacional.

Un ámbito donde esta tecnología podría tener un impacto relevante es en la gestión de los recursos naturales. Colombia, con su gran riqueza ecológica, enfrenta graves problemas asociados a la deforestación, la minería ilegal y el manejo inadecuado de recursos hídricos. La GeoAI ofrece la posibilidad de realizar monitoreos continuos y en tiempo real de estos fenómenos, generando información crucial para diseñar políticas de conservación más efectivas. Por ejemplo, su capacidad para detectar tempranamente actividades como la deforestación o la minería ilegal no solo facilita una intervención oportuna, sino que también contribuye a mitigar los impactos ambientales y a salvaguardar ecosistemas estratégicos que son vitales para la biodiversidad.

En las ciudades colombianas, donde los problemas de movilidad, infraestructura deficiente y desigualdad en el acceso a servicios son evidentes, la GeoAI podría desempeñar un papel transformador. Su capacidad para analizar patrones de movilidad y simular escenarios de desarrollo permite a los tomadores de decisiones diseñar estrategias urbanas más sostenibles y equitativas. La integración de datos socioeconómicos y culturales en los análisis garantiza un enfoque inclusivo, que beneficia tanto a los sectores más vulnerables de la población como a las dinámicas generales

de las ciudades. Por otra parte, herramientas avanzadas como la geovisualización interactiva y adaptativa, junto con la geocodificación y el enriquecimiento de metadatos en bases cartográficas, pueden facilitar el acceso a información clave tanto para las entidades gubernamentales como para los ciudadanos, mejorando la interacción entre ambos actores y promoviendo una gobernanza más transparente y participativa.

En el ámbito de la gestión de desastres naturales, Colombia podría beneficiarse enormemente de las capacidades predictivas de la GeoAI. Este tipo de tecnologías permite anticipar fenómenos como inundaciones, deslizamientos de tierra y terremotos, ofreciendo modelos detallados que contribuyen a una planeación y respuesta más eficaces. En zonas especialmente vulnerables, como las regiones costeras y los Andes, la GeoAI podría optimizar la asignación de recursos y mejorar la resiliencia de las comunidades ante eventos extremos, lo que resulta esencial para proteger vidas y mitigar impactos económicos.

En el combate contra el narcotráfico y la proliferación de economías ilícitas, la GeoAI se perfila como una herramienta fundamental para identificar dinámicas y patrones que anteriormente resultaban imperceptibles. Un ejemplo destacado es el estudio de Hidalgo y Centeno [31], en el cual se desarrolló un modelo basado en GeoAI para identificar estructuras primarias de producción de pasta de cocaína (PBC) en la frontera colombo-venezolana, específicamente en los municipios de Tibú (Colombia) y Jesús María Semprún (Venezuela). Este modelo analizó 16,778 muestras extraídas de imágenes satelitales de PlanetScope con una resolución de 3 metros, lo que permitió detectar y localizar infraestructuras ilegales vinculadas a la producción de PBC. El modelo representa un avance significativo al ofrecer una herramienta que podría facilitar la gestión estratégica de las áreas afectadas por el narcotráfico. Además, los productos generados por el modelo GEOINT proporcionan información valiosa para diseñar estrategias más informadas en la asignación de recursos y la coordinación de operaciones destinadas a combatir estas actividades ilícitas, fortaleciendo así la seguridad nacional.

Por otra parte, la capacidad de la GeoAI para automatizar la creación de productos cartográficos y mejorar su eficiencia representa una oportunidad única para la función pública. La generación automatizada de mapas, el diseño adaptado a necesidades específicas, y la consulta espacial para entidades gubernamentales y ciudadanos son herramientas que no solo modernizan la administración pública, sino que también hacen más accesibles los recursos de información

geoespacial. Estas aplicaciones permiten un análisis más profundo y preciso de datos, facilitando la toma de decisiones y promoviendo una gestión más eficiente de los territorios.

Sin embargo, la adopción de la GeoAI en Colombia enfrenta desafíos significativos. Uno de los principales retos es la falta de infraestructura tecnológica adecuada para procesar grandes volúmenes de datos geoespaciales. Este problema se agudiza en las regiones más alejadas del país, donde el acceso a tecnologías avanzadas es limitado, perpetuando la brecha digital entre zonas urbanas y rurales. Además, es crucial abordar las preocupaciones éticas relacionadas con el uso de datos, incluyendo la privacidad y la posibilidad de que los análisis geoespaciales perpetúen sesgos existentes. Igualmente, la falta de formación especializada en GeoAI limita la capacidad del país para aprovechar estas tecnologías de manera efectiva.

V. CONCLUSIONES

La inteligencia artificial geoespacial (GeoAI) se ha consolidado como una herramienta estratégica para la modernización de la gobernanza, al permitir una gestión más eficiente de los recursos y una toma de decisiones fundamentada en datos. No obstante, su implementación en Colombia enfrenta desafíos importantes relacionados con la infraestructura tecnológica, la interoperabilidad de datos y la necesidad de formación especializada. A pesar de su potencial, la integración de GeoAI requiere superar barreras tecnológicas significativas, especialmente en áreas rurales, donde la limitada infraestructura perpetúa la brecha digital y restringe el acceso equitativo a estas innovaciones.

Asimismo, la adopción de GeoAI plantea desafíos éticos cruciales, como la protección de la privacidad, la transparencia en los procesos y la prevención de sesgos en los algoritmos. La ausencia de marcos regulatorios sólidos podría comprometer los beneficios que esta tecnología ofrece, sobre todo en contextos donde las decisiones impactan a comunidades vulnerables. La falta de explicabilidad en los modelos de IA también constituye una preocupación central, ya que dificulta la comprensión y aceptación de las decisiones automatizadas.

Otro aspecto clave es la necesidad de una formación interdisciplinaria que combine conocimientos técnicos con habilidades en ética, política pública y gestión territorial. La colaboración entre instituciones académicas, el sector público y la industria resulta esencial para desarrollar soluciones que respondan a las necesidades específicas del país. Además, la capacidad de GeoAI para procesar datos en tiempo real y generar información estratégica puede contribuir significativamente a la sostenibilidad y resiliencia de Colombia, especialmente en la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y la mitigación de desastres naturales. En este sentido, la GeoAI no solo representa una innovación tecnológica, sino un catalizador para un desarrollo más equitativo, inclusivo y sostenible.

VI. RECOMENDACIONES

Para maximizar el potencial de la GeoAI en Colombia, es imprescindible invertir en el desarrollo y modernización de la infraestructura tecnológica, especialmente en regiones rurales y marginadas, asegurando una conectividad adecuada y plataformas avanzadas de procesamiento de datos. Esta inversión debe ir acompañada del establecimiento de marcos normativos claros que regulen el uso de GeoAI, protejan la privacidad de los datos y garanticen la transparencia en los procesos de toma de decisiones. Asimismo, se recomienda la creación de políticas públicas que fomenten la participación ciudadana en la definición de los usos y limitaciones de estas tecnologías.

Es fundamental promover programas de formación interdisciplinaria que integren conocimientos técnicos en GeoAI con competencias en ética, gobernanza y gestión territorial, dirigidos tanto a funcionarios públicos como a profesionales del sector privado. Estos programas deben fomentar una cultura de innovación colaborativa que permita el desarrollo de capacidades locales y el fortalecimiento de la gobernanza tecnológica. Además, la investigación y el desarrollo en GeoAI deben incentivarse mediante la creación de fondos específicos y la promoción de alianzas estratégicas entre universidades, centros de investigación y entidades gubernamentales, con un enfoque en resolver problemáticas locales prioritarias.

Se recomienda crear sistemas de monitoreo geoespacial en tiempo real capaces de detectar de manera temprana actividades como la deforestación, la minería ilegal y otros usos no autorizados del suelo. Estos sistemas deben ser gestionados por entidades públicas, especialmente por autoridades ambientales y territoriales, en colaboración con ministerios relevantes, y contar con alertas automáticas que faciliten intervenciones rápidas y coordinadas. Asimismo, los datos generados deben ser de acceso público para fomentar la transparencia, la rendición de cuentas y la participación de la ciudadanía en la vigilancia y protección del territorio, fortaleciendo así la capacidad de respuesta ante amenazas ambientales y promoviendo una gobernanza más inclusiva y eficaz.

Para mejorar la automatización de procesos cartográficos en el sector público, es necesario desarrollar herramientas de inteligencia artificial que automaticen la generación de mapas temáticos y la actualización de bases de datos geoespaciales. Se debe implementar un protocolo

estándar para la integración de datos provenientes de diferentes fuentes (imágenes satelitales, sensores remotos y drones) en los SIG utilizados por las entidades gubernamentales. Esto garantizará la producción eficiente de cartografía actualizada y la optimización de recursos en la planificación territorial.

Finalmente, se recomienda integrar la GeoAI en las actividades cotidianas de las instituciones públicas mediante proyectos piloto específicos, como la planificación de infraestructura vial o la gestión del riesgo de desastres. Estos proyectos deben incluir evaluaciones periódicas de impacto y generar informes que permitan identificar buenas prácticas y lecciones aprendidas. Además, es crucial que se desarrolle una plataforma de intercambio de información entre entidades gubernamentales para compartir avances, retos y resultados relacionados con la implementación de GeoAI, fomentando así una adopción coordinada y efectiva de estas tecnologías en todo el territorio nacional.

REFERENCIAS

- [1] D. Chen, “Exemplification on Potential Applications and Scenarios for GeoAI,” in *2023 Asia-Europe Conference on Electronics, Data Processing and Informatics (ACEDPI)*, Apr. 2023, pp. 245–248. doi: 10.1109/ACEDPI58926.2023.00054.
- [2] Y. Hu *et al.*, “A five-year milestone: reflections on advances and limitations in GeoAI research,” *Ann GIS*, vol. 30, no. 1, pp. 1–14, 2024, doi: 10.1080/19475683.2024.2309866.
- [3] G. author C.-I. Bordogna Via A. Corti 12 20133 Milano Italy\$\$QBordogna Gloria, “Artificial Intelligence for Multisource Geospatial Information,” *Alma*, Dec. 2022, [Online]. Available:
https://search.nal.usda.gov/permalink/01NAL_INST/27vehl/alma9916410992407426
- [4] Y. Song, M. Kalacska, M. Gašparović, J. Yao, and N. Najibi, “Advances in geocomputation and geospatial artificial intelligence (GeoAI) for mapping,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 120, p. 103300, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103300>.
- [5] A. Zhang and J. Zhu, “Opportunities and Challenges of Cartography Research Driven by New Generation Artificial Intelligence | 新一代人工智能驱动下地图学研究的机遇与挑战,” *Journal of Geo-Information Science*, vol. 26, no. 1, pp. 35–45, 2024, doi: 10.12082/dqxxkx.2024.240128.
- [6] J. Liu *et al.*, “Research Progress of Cartography Highlighted by the 31st International Cartographic Conference | 从第 31 届国际制图大会看地图制图学的研究进展,” *Journal of Geo-Information Science*, vol. 26, no. 1, pp. 3–14, 2024, doi: 10.12082/dqxxkx.2024.230788.
- [7] Y. Kang, S. Gao, and R. E. Roth, “Artificial intelligence studies in cartography: a review and synthesis of methods, applications, and ethics,” *Cartogr Geogr Inf Sci*, 2024, doi: 10.1080/15230406.2023.2295943.
- [8] H. Ouchra, A. Belangour, and A. Erraissi, “An overview of GeoSpatial Artificial Intelligence technologies for city planning and development,” in *2023 5th International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies, ICECCT 2023*, 2023. doi: 10.1109/ICECCT56650.2023.10179796.

-
- [9] R. Marasinghe, T. Yigitcanlar, S. Mayere, T. Washington, and M. Limb, “Computer vision applications for urban planning: A systematic review of opportunities and constraints,” *Sustain Cities Soc*, vol. 100, p. 105047, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105047>.
- [10] T. H. Son, Z. Weedon, T. Yigitcanlar, T. Sanchez, J. M. Corchado, and R. Mehmood, “Algorithmic urban planning for smart and sustainable development: Systematic review of the literature,” *Sustain Cities Soc*, vol. 94, p. 104562, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104562>.
- [11] S. E. Bibri, J. Huang, S. K. Jagatheesaperumal, and J. Krogstie, “The synergistic interplay of artificial intelligence and digital twin in environmentally planning sustainable smart cities: A comprehensive systematic review,” *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 20, p. 100433, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.es.2024.100433>.
- [12] K. J. Sowmiya Narayanan and A. Manimaran, “Recent developments in geographic information systems across different application domains: a review,” *Knowl Inf Syst*, vol. 66, no. 3, pp. 1523–1547, Mar. 2024, doi: [10.1007/S10115-023-01969-5](https://doi.org/10.1007/S10115-023-01969-5).
- [13] R. Mortaheb and P. Jankowski, “Smart city re-imagined: City planning and GeoAI in the age of big data,” *Journal of Urban Management*, vol. 12, no. 1, pp. 4–15, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jum.2022.08.001>.
- [14] F. Gaglione, “Urban planning and GeoAI in smart city policies,” *TeMA Journal of Land Use, Mobility and Environment*, vol. 16, no. 3, pp. 631–637, 2023, doi: [10.6093/1970-9870/10317](https://doi.org/10.6093/1970-9870/10317).
- [15] S. Wang *et al.*, “Mapping the landscape and roadmap of geospatial artificial intelligence (GeoAI) in quantitative human geography: An extensive systematic review,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 128, p. 103734, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103734>.
- [16] P. Liu and F. Biljecki, “A review of spatially-explicit GeoAI applications in Urban Geography,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 112, p. 102936, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102936>.
- [17] C. Gonzales-Inca *et al.*, “Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI) in the Integrated Hydrological and Fluvial Systems Modeling: Review of Current Applications and Trends,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 14, 2022, doi: [10.3390/w14142211](https://doi.org/10.3390/w14142211).

-
- [18] K. Cao, C. Zhou, R. Church, X. Li, and W. Li, “Revisiting spatial optimization in the era of geospatial big data and GeoAI,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 129, p. 103832, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103832>.
- [19] Q. Zhang, Y. Kang, and R. Roth, “The Ethics of AI-Generated Maps: DALL·E 2 and AI’s Implications for Cartography,” in *Leibniz International Proceedings in Informatics, LIPIcs*, 2023. doi: 10.4230/LIPIcs.GIScience.2023.93.
- [20] Y. S. Hwang, J. S. Um, B. Pradhan, T. Choudhury, and S. Schlueter, “How does ChatGPT evaluate the value of spatial information in the 4th industrial revolution?,” *Spatial Information Research*, vol. 32, no. 2, pp. 187–194, Apr. 2024, doi: 10.1007/S41324-023-00567-5.
- [21] H. X. Y. L. C. Z. H. N. R. Z. Z. L. Siqin Wang Tao Hu and X. Ye, “GPT, large language models (LLMs) and generative artificial intelligence (GAI) models in geospatial science: a systematic review,” *Int J Digit Earth*, vol. 17, no. 1, p. 2353122, 2024, doi: 10.1080/17538947.2024.2353122.
- [22] Z. Li and H. Ning, “Autonomous GIS: the next-generation AI-powered GIS,” *Int J Digit Earth*, vol. 16, no. 2, pp. 4668–4686, 2023, doi: 10.1080/17538947.2023.2278895.
- [23] J. Rao, S. Gao, G. Mai, and K. Janowicz, “Building Privacy-Preserving and Secure Geospatial Artificial Intelligence Foundation Models (Vision Paper),” in *GIS: Proceedings of the ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, 2023. doi: 10.1145/3589132.3625611.
- [24] S. Maalsen, J. Cinnamon, and S. Kinsley, “Artificial intelligence, geography and society,” *Digital Geography and Society*, vol. 4, p. 100061, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.diggeo.2023.100061>.
- [25] H. J. M. R. S. I. T. Stefano De Sabbata Andrea Ballatore and G. Yeboah, “GeoAI in urban analytics,” *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 37, no. 12, pp. 2455–2463, 2023, doi: 10.1080/13658816.2023.2279978.
- [26] I. Oluoch, “Crossing Boundaries: The Ethics of AI and Geographic Information Technologies,” *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 13, no. 3, 2024, doi: 10.3390/ijgi13030087.
- [27] J. Xing and R. Sieber, “The challenges of integrating explainable artificial intelligence into GeoAI,” *Transactions in GIS*, vol. 27, no. 3, pp. 626–645, 2023, doi: 10.1111/tgis.13045.

-
- [28] S. Scheider and K. F. Richter, “Pragmatic GeoAI: Geographic Information as Externalized Practice,” *KI - Kunstliche Intelligenz*, vol. 37, no. 1, pp. 17–31, Mar. 2023, doi: 10.1007/S13218-022-00794-2.
- [29] S. T. Arundel, W. Li, and B. B. Campbell, “Reimagining standardization and geospatial interoperability in today’s GeoAI culture,” in *GeoAI 2023 - Proceedings of the 6th ACM SIGSPATIAL International Workshop on AI for Geographic Knowledge Discovery*, 2023, pp. 83–84. doi: 10.1145/3615886.3627744.
- [30] Y. Hu, Z. Gui, J. Wang, and M. Li, “Enriching the metadata of map images: a deep learning approach with GIS-based data augmentation,” *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 36, no. 4, pp. 799–821, 2022, doi: 10.1080/13658816.2021.1968407.
- [31] J. J. P. Hidalgo and J. A. S. Centeno, “Geospatial Intelligence and Artificial Intelligence for Detecting Potential Coca Paste Production Infrastructure in the Border Region of Venezuela and Colombia,” *Journal of Applied Security Research*, vol. 18, no. 4, pp. 1000–1050, 2023, doi: 10.1080/19361610.2022.2111184.