

Artificial Intelligence in Civil Engineering: Innovative Strategies to Reduce Pollution and Promote Environmental Sustainability

E. Toriz G¹, Profesora Investigadora. A.D. García G², Profesor Investigador. M. Aparicio P³, Presidente.
J.M Díaz T⁴, Profesor.

¹ Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Campus Estado de México. México. etoriz@tec.mx

² Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Campus Estado de México. México. garcia.andres@tec.mx

³ Sociedad Interactiva de Capacitación y Educación para el Desarrollo Sustentable.SICEDES.México.marceapario4@gmail.com

⁴ Sociedad Interactiva de Capacitación y Educación para el Desarrollo Sustentable.SICEDES.México.manueldiaztoriz@gmail.com

Abstract– *This study analyzes the impact of Artificial Intelligence (AI) on reducing environmental pollution in the field of civil engineering. With a growing focus on sustainability and environmental protection, AI offers innovative methods to decrease resource usage, waste generation, and pollution in construction and urban development. The study examines various applications of AI, such as resource optimization, waste reduction, energy efficiency, smart infrastructure, and real-time environmental pollution monitoring. Through advanced algorithms, AI can process large volumes of data to predict material wear and plan preventive maintenance, minimizing the need for frequent replacements. Key findings indicate that AI promotes sustainability by improving material use, optimizing recycling processes, and reducing energy consumption in buildings and infrastructure. For example, AI can automatically adjust HVAC systems in buildings to maximize energy efficiency by considering occupancy and weather conditions. Additionally, it enables precise monitoring and forecasting of pollution, facilitating timely interventions. Despite its potential, the widespread implementation of AI faces significant challenges such as high costs, lack of standardized data, and resistance to technological adoption. The study concludes that despite these challenges, AI has great potential to foster environmentally sustainable practices, and overcoming these barriers will be crucial for its broader adoption in civil engineering.*

Key Words-- *Artificial Intelligence (AI), Environmental Impact, Educational innovation, Higher education, Professional education.*

Inteligencia Artificial en Ingeniería Civil: Estrategias Innovadoras para Reducir la Contaminación y Promover la Sostenibilidad Ambiental

E. Toriz G¹, Profesora Investigadora. A.D. García G², Profesor Investigador. M. Aparicio P³, Presidente.
J.M Díaz T⁴, Profesor.

¹ Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Campus Estado de México. México. etoriz@tec.mx

² Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Campus Estado de México. México. garcia.andres@tec.mx

³ Sociedad Interactiva de Capacitación y Educación para el Desarrollo Sustentable.SICEDES.México.marceapario4@gmail.com

⁴ Sociedad Interactiva de Capacitación y Educación para el Desarrollo Sustentable.SICEDES.México.manueldiaztoriz@gmail.com

Resumen— Este estudio analiza el impacto de la Inteligencia Artificial (IA) en la reducción de la contaminación ambiental en el campo de la ingeniería civil. Con un enfoque creciente en la sostenibilidad y la protección del medio ambiente, la IA ofrece métodos innovadores para disminuir el uso de recursos, la generación de desechos y la contaminación en la construcción y el desarrollo urbano. El estudio examina varias aplicaciones de la IA, como la optimización de recursos, reducción de desechos, eficiencia energética, infraestructura inteligente y monitoreo en tiempo real de la contaminación ambiental. Mediante algoritmos avanzados, la IA puede procesar grandes volúmenes de datos para prever el desgaste de materiales y planificar el mantenimiento preventivo, minimizando la necesidad de reemplazos frecuentes. Los hallazgos clave indican que la IA favorece la sostenibilidad al mejorar el uso de materiales, optimizar los procesos de reciclaje, y reducir el consumo energético en edificios e infraestructuras. Por ejemplo, la IA puede ajustar automáticamente los sistemas de climatización en edificios para maximizar la eficiencia energética considerando la ocupación y las condiciones meteorológicas. Además, permite un monitoreo preciso y pronóstico de la contaminación, facilitando intervenciones oportunas. A pesar de su potencial, la implementación generalizada de la IA enfrenta retos significativos como altos costos, falta de datos estandarizados y resistencia a la adopción tecnológica. El estudio concluye que, a pesar de estos desafíos, la IA tiene un gran potencial para fomentar prácticas ambientalmente sostenibles, y superar estas barreras será crucial para su adopción más amplia en la ingeniería civil.

Palabras Clave — Inteligencia Artificial (IA), Impacto Ambiental, Innovación educativa, Educación superior, Educación profesional.

I. INTRODUCCIÓN

La Inteligencia Artificial (IA) ha emergido como una fuerza transformadora en numerosas industrias, incluyendo la ingeniería civil, donde tiene un potencial inmenso para abordar desafíos ambientales [1].

El campo de la ingeniería civil está intrínsecamente ligado al desarrollo de infraestructuras, lo cual a menudo implica impactos ambientales significativos como el agotamiento de recursos, emisiones de gases de efecto invernadero y generación de residuos.

A medida que crecen las preocupaciones globales sobre la sostenibilidad ambiental, la adopción de tecnologías innovadoras como la IA se ha vuelto crítica para minimizar la contaminación y fomentar prácticas de construcción ecológicas [2].

Las soluciones impulsadas por IA en la ingeniería civil ofrecen la capacidad de optimizar la utilización de recursos, reducir residuos y mejorar la eficiencia energética en los proyectos de construcción. Los algoritmos avanzados y los modelos de aprendizaje automático pueden analizar vastos conjuntos de datos para predecir impactos ambientales, diseñar materiales sostenibles y monitorear los niveles de contaminación en tiempo real. Por ejemplo, mediante la recopilación de datos de sensores y satélites, la IA puede proporcionar evaluaciones precisas del desgaste de materiales, lo que permite el mantenimiento preventivo y reduce la necesidad de reemplazos frecuentes.

Además, la IA facilita el desarrollo de infraestructuras verdes al permitir precisión en la planificación, reducir el consumo de energía en los sistemas de transporte y asegurar el cumplimiento de las regulaciones ambientales [3]. Algoritmos de IA pueden optimizar las rutas de transporte para minimizar el consumo de combustible y las emisiones de CO₂. Asimismo, la IA puede ajustar automáticamente los sistemas de climatización y de iluminación en edificios, mejorando significativamente la eficiencia energética.

Este artículo explora el papel multifacético de la IA en la minimización de la contaminación ambiental dentro de la ingeniería civil. Al examinar sus aplicaciones en áreas como la construcción inteligente, la gestión de residuos y el control de la contaminación, la discusión destaca cómo las tecnologías de IA pueden revolucionar las prácticas de ingeniería sostenible para satisfacer las demandas de un mundo cada vez más consciente del medio ambiente.

II. MARCO TEÓRICO

La integración de la Inteligencia Artificial (IA) en la ingeniería civil ha ganado una atención significativa.

Primordialmente debido a su potencial para mejorar la sostenibilidad y reducir la contaminación ambiental. Varios estudios han explorado las diversas aplicaciones de la IA para abordar los desafíos ambientales que enfrentan los sectores de la construcción y la infraestructura. Esta revisión de la literatura examina la investigación existente sobre cómo la IA contribuye a la minimización de la contaminación, centrándose en áreas clave como la optimización de recursos, la reducción de residuos, la eficiencia energética y el desarrollo de infraestructuras inteligentes.

La optimización de recursos es una de las aplicaciones más impactantes de la IA en la ingeniería civil [4], la IA puede emplearse para analizar datos de los sitios de construcción, lo que permite una gestión más eficiente de materiales, equipos y mano de obra. Los algoritmos de aprendizaje automático predicen patrones de consumo de recursos, lo que puede ayudar a reducir el desperdicio de materiales, minimizar los costos de transporte y optimizar la gestión de la cadena de suministro. Estas prácticas contribuyen a la reducción de emisiones de carbono y el consumo de energía durante las actividades de construcción. Las herramientas de optimización basadas en IA son particularmente valiosas en proyectos de infraestructura a gran escala, donde la gestión de recursos es un desafío crítico [5].

La industria de la construcción es responsable de una parte significativa de la producción global de residuos, con escombros de construcción y demolición (C&D) contribuyendo a los vertederos en todo el mundo. Las tecnologías de IA han mostrado promesa en la gestión y reducción de residuos en proyectos de ingeniería civil. En un estudio [6], se utilizaron técnicas de IA para analizar patrones de generación de residuos y sugerir métodos para reducir la cantidad de residuos enviados a los vertederos. Al utilizar la IA para monitorear los residuos del sitio de construcción en tiempo real, es posible clasificar y reciclar materiales de manera más eficiente [7]. Además, se han desarrollado sistemas robóticos habilitados por IA para ayudar en la clasificación y procesamiento automático de materiales como concreto, metales y plásticos, promoviendo una economía circular dentro del sector de la construcción.

El papel de la IA en la mejora de la eficiencia energética en la ingeniería civil ha sido ampliamente investigado. Los sistemas impulsados por IA pueden optimizar el consumo de energía en edificios e infraestructuras al integrar sensores y algoritmos de aprendizaje automático para controlar los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). Los sistemas de gestión de edificios (BMS) impulsados por IA se han implementado con éxito para reducir el consumo de energía y las emisiones asociadas [8].

Estos sistemas predicen las demandas de energía y ajustan las operaciones del edificio en consecuencia, minimizando el desperdicio de energía y contribuyendo a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La IA también puede utilizarse para mejorar el rendimiento energético de los

sistemas de transporte al optimizar el flujo de tráfico y reducir la congestión, lo que disminuye las emisiones de los vehículos.

La IA juega un papel crucial en el diseño y mantenimiento de infraestructuras sostenibles. Las ciudades inteligentes, que integran la IA y el Internet de las Cosas (IoT), utilizan datos en tiempo real para gestionar los recursos de manera eficiente y reducir los impactos ambientales. Un estudio [9] destacó cómo los sistemas basados en IA pueden optimizar las redes de distribución de agua, reducir el uso de energía en la iluminación de calles y mejorar la gestión de residuos en entornos urbanos. Estos avances apoyan el desarrollo de ciudades más verdes con una menor huella ambiental. La IA también es fundamental en la planificación urbana sostenible, donde se utiliza para predecir los impactos ambientales a largo plazo de los proyectos de construcción y proporcionar información sobre cómo se pueden diseñar los paisajes urbanos para minimizar la contaminación y promover la biodiversidad.

La IA ha demostrado ser efectiva en la monitorización de los niveles de contaminación en tiempo real, ofreciendo un enfoque más proactivo para la protección ambiental. Los modelos de aprendizaje automático se han utilizado para predecir la calidad del aire y del agua en función de varios parámetros, como los patrones de tráfico, las condiciones meteorológicas y las emisiones industriales. Según Bibri et al. [10], las aplicaciones de IA en la monitorización ambiental ayudan a identificar puntos críticos de contaminación y desarrollar estrategias para mitigar su impacto. Los sensores y drones impulsados por IA se utilizan cada vez más en la ingeniería civil para recopilar datos ambientales de los sitios de construcción y las áreas circundantes, lo que permite una mejor toma de decisiones en cuanto al control de la contaminación y el cumplimiento de las regulaciones ambientales [11].

A medida que el cambio climático continúa planteando desafíos para la industria de la construcción, se está utilizando la IA para desarrollar infraestructuras resilientes al clima que puedan soportar condiciones meteorológicas extremas mientras minimizan los impactos ambientales. Los modelos de IA pueden predecir los efectos del cambio climático en las infraestructuras, ayudando a los ingenieros a diseñar estructuras mejor equipadas para manejar el aumento de temperaturas, inundaciones y otros fenómenos relacionados con el clima.

La IA también puede optimizar el uso de materiales de bajo carbono en la construcción, reduciendo aún más la huella de carbono de los edificios e infraestructuras [12].

Si bien la IA presenta oportunidades significativas para reducir la contaminación ambiental en la ingeniería civil, quedan varios desafíos. Una de las principales barreras es la alta inversión inicial requerida para la implementación de la IA, lo que puede ser prohibitivo para las pequeñas y medianas empresas en el sector de la construcción. Además, existe la necesidad de marcos de intercambio de datos más robustos, ya

que muchas aplicaciones de IA dependen de grandes conjuntos de datos para funcionar de manera efectiva. Investigadores sugieren que el desarrollo de protocolos estandarizados para la integración de la IA y la recopilación de datos será esencial para escalar estas tecnologías en toda la industria [13].

Las investigaciones futuras podrían centrarse en refinar los algoritmos de IA para desafíos ambientales específicos, como los sistemas de captura de carbono y los sistemas de conversión de residuos en energía.

La literatura destaca el creciente papel de la inteligencia artificial en la minimización de la contaminación ambiental dentro de la ingeniería civil. Desde la optimización del uso de recursos y la reducción de residuos hasta la mejora de la eficiencia energética y el apoyo a la planificación urbana sostenible, la IA está transformando la manera en que la industria de la construcción aborda su impacto ambiental. Sin embargo, la integración exitosa de la IA requiere superar barreras financieras y técnicas, así como asegurar la disponibilidad de datos confiables. A medida que las tecnologías de IA continúan evolucionando, sin duda jugarán un papel fundamental en el avance de la sostenibilidad en la ingeniería civil y la minimización del impacto ambiental.

III. PROBLEMA DE ESTUDIO

La integración de la Inteligencia Artificial (IA) en la ingeniería civil para minimizar la contaminación ambiental ofrece numerosas oportunidades, pero varios desafíos deben ser abordados para una implementación efectiva. Este estudio tiene como objetivo explorar el potencial de la IA en la transformación de la industria de la ingeniería civil, pero es esencial considerar los siguientes problemas clave que podrían obstaculizar su adopción generalizada y su impacto.

Un obstáculo significativo para la integración de la IA en la ingeniería civil es la considerable inversión inicial requerida. La adquisición de infraestructura, software, capacitación y actividades de investigación y desarrollo puede resultar costosa.

Este desafío es particularmente pronunciado para las pequeñas y medianas empresas (PYMEs) que pueden tener dificultades para cubrir estos costos. Como se menciona en un estudio [14], a pesar de los beneficios a largo plazo, la inversión inicial sigue siendo una barrera crítica, especialmente en países con recursos financieros limitados.

Las aplicaciones impulsadas por IA en la ingeniería civil dependen de vastas cantidades de datos, pero las prácticas de recolección de datos en la industria de la construcción suelen estar fragmentadas e inconsistentes. No existe un estándar universalmente aceptado para la calidad de los datos, los formatos o los protocolos de intercambio, lo que hace difícil integrar modelos de IA de manera efectiva en diferentes sectores y regiones.

La falta de conjuntos de datos estandarizados puede llevar a inexactitudes en las predicciones, haciendo difícil desarrollar soluciones de IA que puedan funcionar universalmente en diversos proyectos de construcción y condiciones ambientales [15].

La recolección y el procesamiento de grandes volúmenes de datos en la ingeniería civil, incluyendo información sensible sobre sitios de construcción y factores ambientales, plantean importantes preocupaciones de privacidad y seguridad. La integración de IA con dispositivos IoT y plataformas en la nube aumenta el riesgo de brechas de datos, acceso no autorizado y uso indebido de la información. Garantizar la seguridad de estos datos es esencial para mantener la confiabilidad de las aplicaciones de IA y fomentar su adopción.

La implementación de tecnologías de IA en la ingeniería civil requiere habilidades y conocimientos especializados. La complejidad de los algoritmos de IA y la falta de profesionales capacitados en ambas disciplinas, IA e ingeniería civil, representan un desafío significativo. La escasez de programas de capacitación interdisciplinaria [16] limita la capacidad de los ingenieros para trabajar eficazmente con soluciones impulsadas por IA, lo que podría obstaculizar su integración exitosa en la industria.

La industria de la construcción es tradicionalmente lenta en adoptar nuevas tecnologías, y existe una resistencia significativa al cambio. Muchos profesionales pueden tener una conciencia limitada de los beneficios potenciales de la IA para reducir la contaminación ambiental y mejorar la sostenibilidad. Superar esta resistencia requiere campañas de concienciación, educación y la demostración de estudios de casos exitosos que muestren las ventajas tangibles de la integración de la IA en las prácticas de construcción [17].

Aunque la IA tiene el potencial de reducir la contaminación ambiental, su implementación también plantea preocupaciones éticas y ambientales. Las técnicas de construcción impulsadas por IA, como la automatización y la robótica, podrían desplazar a los trabajadores en roles de construcción tradicionales [18]. Además, el desarrollo y despliegue de sistemas de IA conlleva un consumo de energía significativo para el procesamiento de datos y la producción de hardware. Es crucial encontrar un equilibrio entre el avance tecnológico y sus implicaciones éticas y ambientales [19].

Este estudio reconoce el significativo potencial de la IA para minimizar la contaminación ambiental en la ingeniería civil.

No obstante, también identifica diversos desafíos que deben abordarse para una implementación exitosa. Superar las barreras financieras, mejorar los estándares de datos, abordar las preocupaciones éticas y fomentar la experiencia técnica son pasos cruciales para asegurar que la IA se integre efectivamente en la industria de la ingeniería civil, promoviendo así la sostenibilidad y la protección ambiental.

En el contexto del Tecnológico de Monterrey convencidos de que "se está viviendo un cambio en nuestro planeta que avanza a un ritmo exponencial, en la actualmente reconocida como la Revolución 5.0" se busca potenciar las habilidades de las generaciones actuales -nativos digitales- y mejorar el desarrollo de las competencias que les son requeridas a los egresados en el campo laboral [20]. Así los estudiantes universitarios, especialmente aquellos que se especializan en áreas como la ingeniería civil, ambiental y otras disciplinas relacionadas, deben conocer y aplicar herramientas de Inteligencia Artificial (IA) para reducir el impacto ambiental de sus acciones por diversas razones fundamentales.

Por lo que el objetivo principal de este estudio es explorar el papel de la Inteligencia Artificial (IA) en la minimización de la contaminación ambiental dentro del sector de la ingeniería civil mediante un análisis exhaustivo de las aplicaciones de IA en proyectos relacionados recopilando y analizando datos a través de estudios de caso, revisión de literatura, entrevistas con profesionales del sector y el uso de algoritmos de IA para modelar y simular escenarios de sostenibilidad, así como evaluar la contribución de las tecnologías de IA en prácticas sostenibles

Para lograrlo se requiere el apoyo de los siguientes objetivos específicos:

Examinar el papel de la IA en la optimización de recursos en la ingeniería civil.

Evaluar el impacto de la IA en la reducción y el reciclaje de residuos en la construcción para mejorar la eficiencia energética.

Investigar las aplicaciones de la IA en la monitorización en tiempo real de la contaminación ambiental, infraestructuras inteligentes y la planificación urbana sostenible.

Identificar los desafíos y barreras para la adopción de la IA en la ingeniería civil.

IV. METODOLOGÍA

Este estudio adoptó un enfoque de métodos mixtos, combinando tanto metodologías de investigación cualitativas como cuantitativas, con el fin de explorar el papel de la Inteligencia Artificial (IA) en la reducción de la contaminación ambiental dentro del ámbito de la ingeniería civil. En la fase inicial, se realizó una exhaustiva revisión de la literatura existente, abarcando aplicaciones de IA en la construcción, gestión de residuos, eficiencia energética y control de la contaminación, con el propósito de identificar temas clave y lagunas en el conocimiento actual.

A continuación, se diseñó y distribuyó una encuesta dirigida a profesionales de la ingeniería civil y expertos involucrados en proyectos basados en IA con el propósito de recopilar datos cuantitativos acerca de la efectividad percibida, desafíos y barreras en la adopción de la IA. Un total de 100

personas participaron en esta encuesta, la cual fue administrada a través de un cuestionario que incluía tanto preguntas cerradas como abiertas. Dicho cuestionario se enfocó en las aplicaciones de la IA para la optimización de recursos, la reducción de residuos y el control de la contaminación dentro de las prácticas de ingeniería civil.

Simultáneamente, se llevaron a cabo entrevistas en profundidad con ingenieros civiles expertos incluyendo 40 de la industria de la construcción, 30 investigadores en IA y 30 consultores ambientales. Estas entrevistas se realizaron con el propósito de obtener opiniones sobre las aplicaciones prácticas y los desafíos asociados a las tecnologías de IA. Las entrevistas proporcionaron una comprensión más profunda de los factores contextuales que influyen en la integración de la IA, tales como la viabilidad técnica, las restricciones financieras y las preocupaciones regulatorias.

El análisis de los datos recopilados implicó tanto métodos estadísticos como análisis temáticos. Se utilizaron estadísticas descriptivas para analizar los datos cuantitativos provenientes de la encuesta. En cuanto a las respuestas cualitativas de las entrevistas, estas fueron codificadas y analizadas en busca de temas recurrentes.

Los hallazgos de ambas fuentes de datos fueron triangulados para asegurar la fiabilidad y validez de los resultados. Esta metodología permitió al estudio captar una amplia gama de perspectivas sobre el potencial de la IA en la ingeniería civil, abordando al mismo tiempo las barreras y desafíos para su implementación efectiva.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los datos de la encuesta y las entrevistas con expertos proporcionó valiosos conocimientos sobre cómo las tecnologías de IA contribuyen a prácticas sostenibles, centrándose en: a) la optimización de recursos; b) la reducción de residuos; c) la eficiencia energética; d) el control de la contaminación; y e) el desarrollo de infraestructuras inteligentes.

A. Optimización de recursos

La encuesta reveló que el 100% de los encuestados considera que la IA mejora significativamente la optimización de recursos en la ingeniería civil.

Los algoritmos de aprendizaje automático son comúnmente empleados para predecir necesidades de materiales, optimizar el uso de equipos y gestionar recursos laborales.

Gracias a las capacidades predictivas de la IA, se mejora la planificación de proyectos, reduciendo el desperdicio de materiales y el transporte innecesario, lo que ahorra costos y minimiza el impacto ambiental [21]. Sin embargo, se observó que el alto costo inicial de las herramientas de IA limita su adopción en proyectos de menor escala.

La Figura 1 muestra la forma en los sistemas impulsados por IA, incluidos el modelado predictivo, los algoritmos de aprendizaje automático, el análisis de datos y la automatización, trabajan juntos para optimizar los recursos en proyectos de ingeniería civil.

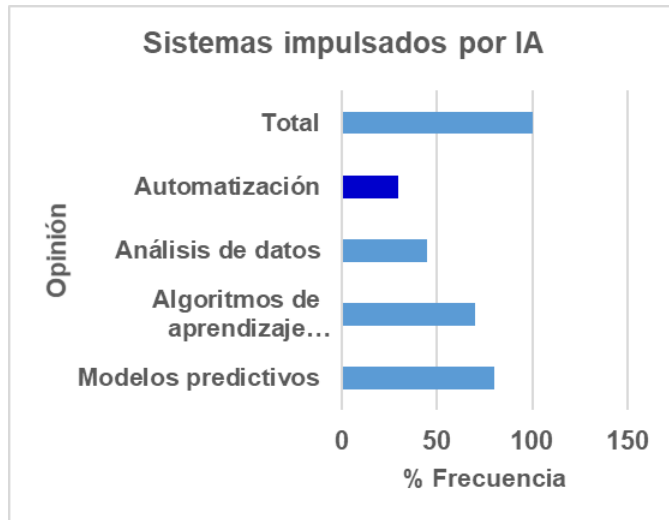


Fig. 1 Contribución de IA a la optimización de recursos en IC

Los sistemas impulsados por IA, que incluyen modelado predictivo, algoritmos de aprendizaje automático, análisis de datos y automatización, procesan datos de múltiples fuentes como sensores, dispositivos IoT y datos históricos de proyectos. Estos sistemas interpretan datos y toman decisiones en tiempo real, previniendo la demanda de materiales y necesidades de equipos con alta precisión [22]. El aprendizaje continuo mejora la toma de decisiones a través del análisis de datos de proyectos anteriores, permitiendo ajustes y asignación óptima de recursos a lo largo del ciclo de vida del proyecto [23]. Además, el análisis de datos en tiempo real y la automatización reducen errores humanos y aumentan la productividad, garantizando el uso eficiente de los recursos [24], [25].

B. Reducción de residuos

El estudio indica que la IA tiene un impacto significativo en la reducción de residuos de construcción, con un 70% de los participantes reportando resultados positivos en la gestión de residuos mediante el uso de IA. La robótica habilitada por IA y los sistemas automatizados de clasificación destacan por su capacidad para mejorar el reciclaje, clasificando materiales como concreto, metales y plásticos de manera más eficiente. Además, las herramientas de IA rastrean y analizan la producción de residuos en los sitios de construcción, permitiendo ajustes en tiempo real. La IA también identifica oportunidades para reutilizar materiales, alineándose con un modelo de economía circular, aunque se requiere mayor

desarrollo para una adopción masiva [26]. Los sistemas de IA recopilan y procesan datos de tasas de generación de residuos, tipos de materiales y capacidades de reciclaje, integrándose con otras tecnologías para eficientar la gestión de residuos [27]. Los algoritmos de aprendizaje automático y la robótica automatizan la clasificación de residuos, reduciendo errores humanos y aumentando las tasas de reciclaje [28]. La Figura 2 ilustra cómo los sistemas basados en IA pueden optimizar la reducción y el reciclaje de residuos en proyectos de ingeniería civil.

Aportaciones de IA para optimizar la reducción y el reciclaje de residuos en IC



Fig. 2 Optimización en la reducción y el reciclaje de residuos mediante sistemas impulsados por IA

La IA optimiza el proceso de reciclaje al determinar métodos eficientes de procesamiento de materiales [6]. Sensores y dispositivos IoT monitorizan continuamente la generación de residuos, proporcionando datos en tiempo real para mejorar estrategias de reducción de residuos [29]. La IA aprende de datos históricos para mejorar continuamente las prácticas de gestión de residuos y apoyar la construcción sostenible [27].

C. Eficiencia energética

La IA se considera una de las aplicaciones más prometedoras para mejorar la eficiencia energética. El 90% de los encuestados destacó la efectividad de la IA en la gestión del consumo energético, especialmente en el diseño de edificios y la gestión de infraestructuras como puede observarse en la Figura 3.



Fig. 3 Contribución de IA a la mejora de la eficiencia energética en IC

Los sistemas de gestión de edificios basados en IA (BMS) son herramientas clave para optimizar sistemas HVAC, iluminación y distribución de energía. Estos sistemas analizan datos de sensores y ajustan operaciones en tiempo real, reduciendo el desperdicio de energía, ahorrando costos y disminuyendo emisiones de carbono.

La IA también optimiza el flujo de tráfico, reduciendo el consumo energético en infraestructuras de transporte. Sin embargo, la integración de IA en infraestructuras existentes presenta desafíos debido a la modernización intensiva en recursos de edificios antiguos [30].

Los sistemas de IA recopilan y analizan datos de calefacción, ventilación, aire acondicionado (HVAC), iluminación y uso de energía. Sensores y dispositivos IoT recogen datos en tiempo real, enviados para análisis por sistemas de IA que monitorean y optimizan el consumo energético [31].

Los algoritmos de IA predicen necesidades energéticas futuras basándose en datos históricos y condiciones actuales, ajustando configuraciones de HVAC en tiempo real [32]. La IA también facilita la integración con redes inteligentes, gestionando la distribución energética y optimizando el uso de fuentes renovables como solar y eólica. Los procesos impulsados por IA resultan en una reducción del consumo energético y menores emisiones de carbono, promoviendo un entorno sostenible y eficiente [33].

D. Control de la contaminación en tiempo real

Un 82% de los encuestados opinó que las aplicaciones de IA enfocadas en el monitoreo ambiental son esenciales para el control proactivo de la contaminación. Estas herramientas utilizan sensores y análisis de datos para rastrear la calidad del aire y del agua, analizando grandes cantidades de datos ambientales y prediciendo tendencias de contaminación. Los sistemas basados en IA pueden detectar niveles anormales de contaminación en zonas de construcción y alertar a los operadores para permitir acciones correctivas inmediatas. Sin embargo, se destacó la necesidad de modelos de IA más robustos capaces de manejar diversas variables ambientales en diferentes regiones geográficas.

Los sistemas de IA se integran en la infraestructura de monitoreo ambiental utilizando sensores, satélites, drones y dispositivos IoT para recopilar datos sobre la contaminación del aire, agua y suelo.

Estos sistemas procesan y analizan grandes cantidades de datos en tiempo real, rastreando la salud ambiental [30].

Los sensores colocados en diferentes lugares recopilan datos sobre la calidad del aire, material particulado, calidad del agua, temperatura y otros contaminantes, transmitiéndolos a sistemas de IA para su análisis. Los algoritmos de IA identifican patrones en los niveles de contaminación y las fuentes, permitiendo reconocer picos y tendencias estacionales [32].

La IA también utiliza modelado predictivo para prever niveles futuros de contaminación, permitiendo intervenciones proactivas. Los sistemas proporcionan alertas en tiempo real para respuestas rápidas de las autoridades, incluyendo notificaciones sobre áreas que superan los límites de seguridad. Los datos generados por IA ayudan a los responsables de políticas a tomar decisiones informadas sobre planificación urbana sostenible y medidas de control de la contaminación, mejorando la calidad del aire y del agua a largo plazo [33].

E. Desarrollo de infraestructuras inteligentes

Los resultados indicaron que las aplicaciones de la IA en el desarrollo de infraestructura inteligente y en la planificación urbana sostenible están ganando terreno. 68% de los participantes en la encuesta opinó que la IA es capaz de contribuir significativamente al diseño de espacios urbanos eficientes en energía y con bajas emisiones. Las herramientas de IA se aplican frecuentemente en el desarrollo de ciudades inteligentes, donde ayudan a gestionar recursos como agua, residuos y energía. Los encuestados identificaron la capacidad de la IA para optimizar la movilidad urbana, monitorear la calidad ambiental y reducir la contaminación como esenciales para el desarrollo urbano sostenible. Por otro lado, también se indica que la implementación a gran escala requiere superar desafíos regulatorios, problemas de privacidad de datos y la necesidad de sistemas de datos urbanos comprensivos.

En el núcleo de la infraestructura inteligente, las plataformas impulsadas por IA agregan datos de varias fuentes, incluidos sensores, dispositivos IoT y bases de datos urbanas. Estas plataformas permiten la toma de decisiones inteligentes para las operaciones, servicios y gestión de infraestructuras de la ciudad. La integración de la IA asegura que las ciudades sean más eficientes, sostenibles y adaptables a las necesidades cambiantes. Los sistemas impulsados por IA se basan en gran medida en la recolección de datos de sensores y dispositivos IoT instalados en todo el entorno urbano. Estos dispositivos monitorean parámetros como el flujo de tráfico, uso de energía, calidad del aire, gestión de residuos y factores ambientales. Los datos en tiempo real forman la base para el análisis y la toma de decisiones de la IA, permitiendo un monitoreo continuo de la infraestructura de la ciudad.

Retos y barreras para la Adopción de IA en la Ingeniería Civil

El 78% de los encuestados identificó como un desafío significativo la alta inversión inicial requerida para la implementación de IA en la ingeniería civil, dificultando su adopción por firmas más pequeñas y con presupuestos limitados. La falta de datos estandarizados y protocolos de integración también fue una preocupación importante, afectando la efectividad de las soluciones de IA.

Además, se destacó la necesidad de conocimientos especializados y capacitación, ya que muchos ingenieros civiles carecían de la experiencia técnica necesaria. La resistencia al cambio y la percepción de complejidad en las tecnologías de IA también retrasaron su adopción, especialmente en sectores de construcción tradicionales [32].

Los resultados de este estudio corroboran hallazgos previos de que la IA tiene un potencial significativo para mejorar la sostenibilidad en la ingeniería civil al minimizar la contaminación ambiental, conforme a la opinión de los encuestados, según se observa en la Tabla 1.

El uso de la IA en la optimización de recursos, reducción de desechos, eficiencia energética, control de la contaminación en tiempo real y desarrollo de infraestructuras inteligentes ya está dando resultados positivos, como se confirma por la encuesta y las entrevistas con expertos.

TABLA 1
RESULTADOS DE LA ENCUESTA SOBRE EL
IMPACTO DE LAS APLICACIONES DE IA EN
PRÁCTICAS DE INGENIERÍA CIVIL

Item evaluado	%	D.S
Optimización de recursos	100	0
Reducción de residuos	70	0.98
Eficiencia energética	90	1.03
Control de la contaminación en tiempo real	82	1.01
Desarrollo de infraestructuras inteligentes.	68	1.11

Sin embargo, la adopción de la IA en la ingeniería civil no está exenta de desafíos. Las limitaciones financieras, las brechas en la experiencia técnica y las barreras regulatorias continúan limitando su uso generalizado, particularmente entre las pequeñas y medianas empresas. A pesar de estos desafíos, los beneficios a largo plazo de la IA en términos de conservación de recursos, reducción de desechos y mejora de la eficiencia energética son innegables.

Para que la IA alcance su máximo potencial en la ingeniería civil, la industria debe abordar estas barreras mediante inversiones específicas, desarrollo de políticas y el intercambio de conocimientos. Además, serán esenciales investigaciones adicionales y proyectos piloto para perfeccionar las tecnologías de IA y demostrar su efectividad a mayor escala.

Aunque la IA tiene un gran potencial para minimizar la contaminación ambiental en la ingeniería civil, su integración exitosa depende de superar desafíos financieros, técnicos y regulatorios.

Los hallazgos de este estudio contribuyen al creciente cuerpo de conocimiento sobre las aplicaciones de la IA en la ingeniería civil y proporcionan una base para futuras investigaciones y desarrollos en el campo.

VI. RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados de este estudio para maximizar el papel de la Inteligencia Artificial (IA) en la minimización de la contaminación ambiental dentro del sector de la ingeniería civil se recomienda:

1. Inversión en tecnologías de IA: Los gobiernos y las partes interesadas privadas deben aumentar las inversiones en investigación y desarrollo de IA específicas para aplicaciones en ingeniería civil. Esto incluye financiamiento para sistemas de gestión de desechos impulsados por IA, tecnologías de optimización de recursos y soluciones de infraestructura energéticamente eficientes. Tales inversiones pueden impulsar la escalabilidad de las soluciones de IA y reducir los costos de adopción.

2. Estandarización de datos y procesos: Para facilitar la integración fluida de la IA en las prácticas de la ingeniería civil, es crucial establecer estándares industriales para la recopilación, compartición e integración de datos. Desarrollar protocolos estandarizados para el uso de datos de IA en proyectos de construcción mejorará la consistencia, aumentará la colaboración y garantizará la fiabilidad de la toma de decisiones impulsada por IA.

3. Capacitación y desarrollo de habilidades: Existe la necesidad de programas de formación específicos para mejorar las habilidades de los profesionales de la ingeniería civil en herramientas de IA y sus aplicaciones. Al educar a ingenieros, arquitectos y planificadores urbanos sobre tecnologías de IA, el sector puede superar la brecha de habilidades actual, permitiendo una adopción más amplia de soluciones de IA para la sostenibilidad.

4. Apoyo político y regulatorio: Los gobiernos deben introducir políticas que fomenten la adopción de tecnologías de IA en la ingeniería civil. Esto incluye la creación de incentivos para que las empresas de construcción adopten prácticas sostenibles, integren sistemas de IA para el control de la contaminación y proporcionen beneficios fiscales o subsidios para la implementación de sistemas de IA energéticamente eficientes.

5. Enfoque en asociaciones público-privadas (APP): Las asociaciones público-privadas pueden aprovecharse para desarrollar e implementar tecnologías de IA en la ingeniería civil. Las colaboraciones entre organismos gubernamentales, academia y empresas privadas pueden facilitar el intercambio de conocimientos, recursos y experiencia, acelerando la aplicación de la IA en el desarrollo urbano sostenible y la reducción de la contaminación.

6. Mejora de la IA en el monitoreo ambiental en tiempo real: Se recomienda desarrollar aún más los sistemas de monitoreo ambiental impulsados por IA para el seguimiento de la contaminación en tiempo real. La expansión de estos sistemas a más áreas urbanas e industriales puede permitir una mejor identificación de las fuentes de contaminación,

pronósticos más precisos e intervenciones oportunas para prevenir daños ambientales.

7. Fomentar prácticas de economía circular: Las aplicaciones de IA en la gestión de desechos deben expandirse para promover prácticas de economía circular en la construcción. Al optimizar los procesos de reciclaje y reducir los desechos a través de la clasificación inteligente, la IA puede ayudar a cerrar el ciclo en el uso de recursos, fomentando prácticas de construcción más sostenibles y minimizando la contaminación.

VII. LIMITACIONES

Este estudio proporciona información valiosa sobre el papel de la IA en la minimización de la contaminación ambiental en la ingeniería civil, sin embargo, se deben reconocer varias limitaciones:

1. Alcance limitado de los datos. Los datos recopilados para este estudio pueden no ser totalmente representativos del sector de la ingeniería civil a nivel mundial, ya que la investigación se centró principalmente en aplicaciones de IA en regiones o proyectos específicos. Diferentes regiones geográficas pueden tener niveles variados de adopción de IA, entornos regulatorios y condiciones ambientales que podrían influir en los resultados.

2. Barreras tecnológicas y financieras. El alto costo de implementación de tecnologías de IA, particularmente en pequeñas y medianas empresas, presenta una limitación significativa. Muchas empresas de ingeniería civil pueden no tener la capacidad financiera o la infraestructura técnica para integrar soluciones impulsadas por IA, limitando su impacto en la reducción de la contaminación ambiental.

3. Preocupaciones sobre la privacidad y seguridad de los datos. El uso de datos ambientales en tiempo real y sistemas impulsados por IA a menudo implica la recopilación de datos sensibles de varios actores. Las preocupaciones sobre la privacidad relacionadas con el intercambio de datos y los riesgos de seguridad pueden obstaculizar la adopción de tecnologías de IA, particularmente en países con leyes estrictas de protección de datos.

4. Resistencia al cambio. La industria de la ingeniería civil ha sido históricamente lenta en adoptar nuevas tecnologías. La renuencia a cambiar prácticas establecidas, junto con una falta de conciencia o comprensión del potencial de la IA, pueden ser barreras significativas para la adopción de la IA. Esta resistencia cultural puede retrasar la integración de soluciones impulsadas por IA en el control de la contaminación y los esfuerzos de sostenibilidad.

5. Datos a largo plazo limitados sobre la efectividad de la IA. Aunque las tecnologías de IA tienen gran potencial, hay datos a largo plazo limitados sobre su efectividad en reducir la contaminación en ingeniería civil. Se requieren más estudios y proyectos piloto para evaluar su impacto en la sostenibilidad, la reducción de la contaminación y la rentabilidad.

6. Dependencia de factores externos. El éxito de la IA en el control de la contaminación ambiental también depende de factores externos como las regulaciones gubernamentales, las condiciones económicas y la conciencia pública sobre los problemas ambientales. Sin esfuerzos coordinados entre sectores, la IA por sí sola puede no ser suficiente para lograr mejoras significativas en la reducción de la contaminación.

VIII. CONCLUSIONES

La Inteligencia Artificial (IA) tiene un papel fundamental en la minimización de la contaminación ambiental dentro del sector de la ingeniería civil, destacando su potencial para transformar prácticas sostenibles mediante la optimización de recursos, reducción de desechos, eficiencia energética y monitoreo en tiempo real de la contaminación.

Utilizando herramientas y algoritmos impulsados por IA, las prácticas de ingeniería civil pueden mitigar significativamente el daño ambiental mientras mejoran la eficiencia operativa, presentando un camino prometedor hacia infraestructuras sostenibles.

La capacidad de la IA para optimizar el uso de recursos, mejorar procesos de reciclaje y promover soluciones eficientes en la construcción y el desarrollo urbano es crucial para alcanzar infraestructuras sostenibles que minimicen el impacto ambiental.

La IA permite monitorear y predecir los niveles de contaminación en tiempo real y detectar fuentes de contaminación, facilitando a legisladores y planificadores urbanos tomar decisiones basadas en datos que reducen el impacto ambiental de manera significativa.

A pesar de los beneficios, persisten desafíos en la adopción de IA en la ingeniería civil, como los altos costos iniciales, problemas de estandarización de datos y resistencia al cambio tecnológico, que requieren esfuerzos concertados para ser superados.

Es necesario que gobiernos, partes interesadas de la industria e instituciones académicas inviertan en tecnología, desarrollen conocimientos y creen políticas de apoyo que faciliten la integración de la IA en las prácticas diarias de la ingeniería civil.

La IA tiene un inmenso potencial para moldear el futuro de la ingeniería civil ambientalmente sostenible, y las inversiones en investigación de IA, capacitación profesional y marcos de políticas de apoyo serán cruciales para desbloquear todo su potencial en la lucha contra la contaminación ambiental.

RECONOCIMIENTOS

"Los autores desean agradecer el apoyo financiero y técnico de Writing Lab, Institute for the Future of Education, Tecnológico de Monterrey, México, en la producción de este trabajo".

REFERENCIAS

- [1] Habila, M. A., Ouladmane, M., & Alothman, Z. A. (2023). Role of artificial intelligence in environmental sustainability. In *Visualization techniques for climate change with machine learning and artificial intelligence* (pp. 449–469). Elsevier.
- [2] Al-Raei, M. (2024). The smart future for sustainable development: Artificial intelligence solutions for sustainable urbanization. *Sustainable Development*.
- [3] Xiang, Y., Chen, Y., Xu, J., & Chen, Z. (2022). Research on sustainability evaluation of green building engineering based on artificial intelligence and energy consumption. *Energy Reports*, 8, 11378–11391.
- [4] Chen, L., Chen, Z., Zhang, Y., Liu, Y., Osman, A. I., Farghali, M., Hua, J., Al-Fatesh, A., Ihara, I., & Rooney, D. W. (2023). Artificial intelligence-based solutions for climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(5), 2525–2557.
- [5] Liu, W., Xu, Y., Fan, D., Li, Y., Shao, X.-F., & Zheng, J. (2021). Alleviating corporate environmental pollution threats toward public health and safety: the role of smart city and artificial intelligence. *Safety Science*, 143, 105433.
- [6] Gautam, K., Sharma, P., Dwivedi, S., Singh, A., Gaur, V. K., Varjani, S., Srivastava, J. K., Pandey, A., Chang, J.-S., & Ngo, H. H. (2023). A review on control and abatement of soil pollution by heavy metals: Emphasis on artificial intelligence in recovery of contaminated soil. *Environmental Research*, 225, 115592.
- [7] Rane, N. (2023a). Integrating leading-edge artificial intelligence (AI), internet of things (IOT), and big data technologies for smart and sustainable architecture, engineering and construction (AEC) industry: Challenges and future directions. *Engineering and Construction (AEC) Industry: Challenges and Future Directions* (September 24, 2023).
- [8] Nti, E. K., Cobbina, S. J., Attafuah, E. E., Senanu, L. D., Amenyeku, G., Gyan, M. A., Forson, D., & Safo, A.-R. (2023). Water pollution control and revitalization using advanced technologies: Uncovering artificial intelligence options towards environmental health protection, sustainability and water security. *Heliyon*, 9(7).
- [9] Rane, N. L., Paramesha, M., Rane, J., & Kaya, O. (2024). Artificial intelligence, machine learning, and deep learning for enabling smart and sustainable cities and infrastructure. *Artificial Intelligence and Industry in Society*, 5, 2–25.
- [10] Bibri, S. E., Krogstie, J., Kaboli, A., & Alahi, A. (2024). Smarter eco-cities and their leading-edge artificial intelligence of things solutions for environmental sustainability: A comprehensive systematic review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 19, 100330.
- [11] Dehkordi, M. M., Nodeh, Z. P., Dehkordi, K. S., Khorjastan, R. R., & Ghaffarzadeh, M. (2024). Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods. *Results in Engineering*, 102729.
- [12] Adefemi, A., Ukpoju, E. A., Adekoya, O., Abatan, A., & Adegbite, A. O. (2023). Artificial intelligence in environmental health and public safety: A comprehensive review of USA strategies. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 20(3), 1420–1434.
- [13] Zhong, W., Liu, Y., Dong, K., & Ni, G. (2024). Assessing the synergistic effects of artificial intelligence on pollutant and carbon emission mitigation in China. *Energy Economics*, 138, 107829.
- [14] Rane, N. L., Kaya, O., & Rane, J. (2024). Artificial intelligence, machine learning, and deep learning applications in smart and sustainable industry transformation. *Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning for Sustainable Industry*, 5, 2–29.
- [15] Ahmed, M., AlQadhi, S., Mallick, J., Kahla, N. Ben, Le, H. A., Singh, C. K., & Hang, H. T. (2022). Artificial neural networks for sustainable development of the construction industry. *Sustainability*, 14(22), 14738.
- [16] Yu, K. H., Zhang, Y., Li, D., Montenegro-Marin, C. E., & Kumar, P. M. (2021). Environmental planning based on reduce, reuse, recycle and recover using artificial intelligence. *Environmental Impact Assessment Review*, 86, 106492.
- [17] Onyelowe, K. C., Ebid, A. M., Mahdi, H. A., Onyelowe, F. K. C., Shafieyoon, Y., Onyia, M. E., & Onah, H. N. (2023). AI mix design of fly ash admixed concrete based on mechanical and environmental impact considerations. *Civil Engineering Journal*, 9, 27–45.
- [18] Wong, W. Y., Al-Ani, A. K. I., Hasikin, K., Khairuddin, A. S. M., Razak, S. A., Hizaddin, H. F., Mokhtar, M. I., & Azizan, M. M. (2021). Water, soil and air pollutants' interaction on mangrove ecosystem and corresponding artificial intelligence techniques used in decision support systems-a review. *Ieee Access*, 9, 105532–105563.
- [19] Rane, N. (2023b). Potential role and challenges of ChatGPT and similar generative artificial intelligence in architectural engineering. *Available at SSRN 4607767*.
- [20] M. Canu, M., Duque & Cécile de Hosson. “Active Learning session based on Didactical Engineering framework for conceptual change in students equilibrium and stability understanding”, *European Journal of Engineering Education*, 42:1, 32-44, DOI: 10.1080/03043797.2016.1190689.
- [21] Olatunde, T. M., Okwandu, A. C., Akande, D. O., & Sikhakhane, Z. Q. (2024). Reviewing the role of artificial intelligence in energy efficiency optimization. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(4), 1243–1256.
- [22] Chaudhary, G. (2023). Environmental Sustainability: Can Artificial Intelligence be an Enabler for SDGs? *Nature Environment & Pollution Technology*, 22(3).
- [23] Wang, K., Ying, Z., Goswami, S. S., Yin, Y., & Zhao, Y. (2023). Investigating the role of artificial intelligence technologies in the construction industry using a Delphi-ANP-TOPSIS hybrid MCDM concept under a fuzzy environment. *Sustainability*, 15(15), 11848.
- [24] Rakha, N. A. (2023). Artificial Intelligence and Sustainability. *International Journal of Cyber Law*, 1(3).
- [25] Berglund, E. Z., Monroe, J. G., Ahmed, I., Noghabaei, M., Do, J., Pesantez, J. E., Khaksar Fasaee, M. A., Bardaka, E., Han, K., & Proestos, G. T. (2020). Smart infrastructure: a vision for the role of the civil engineering profession in smart cities. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(2), 03120001.
- [26] Amiri, Z., Heidari, A., & Navimipour, N. J. (2024). Comprehensive survey of artificial intelligence techniques and strategies for climate change mitigation. *Energy*, 132827.
- [27] Fan, Z., Yan, Z., & Wen, S. (2023). Deep learning and artificial intelligence in sustainability: a review of SDGs, renewable energy, and environmental health. *Sustainability*, 15(18), 13493.
- [28] Wankhede, V. A., Agrawal, R., Kumar, A., Luthra, S., Pamucar, D., & Stević, Ž. (2024). Artificial intelligence an enabler for sustainable engineering decision-making in uncertain environment: a review and future propositions. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 17(2), 384–401.
- [29] Samaei, S. R. (2024). Using artificial intelligence to increase urban resilience: a case study of Tehran. *13th International Conference on Advanced Research in Science, Engineering and Technology, Brussels, Belgium*.
- [30] Halimuzzaman, M., Sharma, D. J., Bhattacharjee, T., Mallik, B., Rahman, R., Rezaul Karim, M., Masur Ikram, M., & Fokhrul Islam, M. (2024). Blockchain Technology for Integrating Electronic Records of Digital Healthcare System. *Journal of Angiotherapy*, 8(7).
- [31] Halimuzzaman, M., Shama, J., & Khang, A. (2024). Enterprise Resource Planning and Accounting Information Systems: Modeling the Relationship in Manufacturing. In *Machine Vision and Industrial Robotics in Manufacturing* (pp. 418–434). CRC Press.
- [32] Halimuzzaman, M., & Shama, J. (2022). Applications of accounting information system (AIS) under Enterprise resource planning (ERP): A comprehensive review. *International Journal of Early Childhood Special Education (INT-JECSE)*, 14(2), 6801–6806.
- [33] Halimuzzaman, M., & Shama, J. (2024). The Role of Enterprise Resource Planning (ERP) in Improving the Accounting Information System for Organizations. In *Revolutionizing the AI-Digital Landscape* (pp. 263–274). Productivity Press.