

Análisis sistemático de intersecciones entre la inteligencia artificial y sus aplicaciones en la educación ambiental

Systematic Analysis of the Intersections Between Artificial Intelligence and Its Applications in Environmental Education

*Verenice Sánchez-Castillo**

* Doctora en Antropología. Docente de tiempo completo de la Universidad de la Amazonia. Correo electrónico: ve.sanchez@udla.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3669-3123>.

Resumen

Este capítulo presenta un análisis de las intersecciones entre la inteligencia artificial (IA) y la educación ambiental y examina cómo la convergencia tecnológica redefine los procesos pedagógicos actuales. El propósito central es analizar el impacto de la IA en la mejora de las pedagogías ambientales y en la formación de una conciencia ecológica sostenible en los últimos años. La investigación se sustenta en una revisión sistemática bajo la normativa Prisma al analizar una muestra cualitativa de 30 estudios seleccionados de bases de datos de alto impacto como Scopus y Web of Science. Los hallazgos revelan tres núcleos temáticos fundamentales: la sostenibilidad como concepto puente, el uso de *machine learning* en la gestión ambiental y el rol de la educación superior como espacio de innovación. Se destaca que herramientas como los modelos predictivos y el análisis de *big data* favorecen la personalización del aprendizaje y el monitoreo en tiempo real, aunque su implementación enfrenta desafíos éticos y brechas digitales. Se concluye que la integración efectiva de estas tecnologías en los currículos requiere una estrategia estratégica y una capacitación docente integral para asegurar un impacto proambiental real.

Palabras clave: educación ambiental, inteligencia artificial, machine learning, revisión sistemática, sostenibilidad.

Abstract

This chapter presents an analysis of the intersections between artificial intelligence (AI) and environmental education, examining how technological convergence is reshaping contemporary pedagogical processes. Its central purpose is to analyze the impact of AI on the enhancement of environmental pedagogies and on fostering sustainable ecological awareness in recent years. The study is grounded in a systematic review conducted in accordance with PRISMA guidelines, based on a qualitative sample of 30 studies selected from high-impact databases such as Scopus and Web of Science. The findings reveal three core thematic strands: sustainability as a bridging concept, the use of machine learning in environmental management, and the role of higher education as a space for innovation. The results highlight that tools such as predictive models and big data analytics support personalized learning and real-time monitoring, although their implementation faces ethical challenges and digital divides. The chapter concludes that the effective

integration of these technologies into curricula requires a strategic approach and comprehensive teacher training to ensure a genuine pro-environmental impact.

Keywords: artificial intelligence, environmental education, machine learning, sustainability, systematic review.

Introducción

Las transformaciones ambientales y tecnológicas se enmarcan, en la última década, como una tendencia científica que modifica sustancialmente los procesos pedagógicos, como remarca Afanador (2023) en su investigación. Tal es el caso que, en este período, la educación ambiental ha conseguido instaurarse inequívocamente como una postura insustituible en el impulso sostenible y ecológicamente consciente, hecho remarcado especialmente en los estudios de González (2023), Suárez-Perales *et al.* (2021) y Van de Wetering *et al.* (2022).

Al respecto, no se puede dejar de mencionar, en esta axiología ambientalista, el aporte de Díaz-López *et al.* (2023). Para estos autores, la educación con enfoque ambiental evolucionó sustancialmente desde su génesis como práctica de construcción ecológica. Así, en el auge científico contemporáneo, trasciende esta formulación genérica inicial para adoptar la educación en hábitos de consumo interrelacionados, además, con economías locales y, como eje mediador, con la reducción de la huella ambiental, como indican Tian *et al.* (2024) en su estudio.

A pesar de este evidente crecimiento en interés y corpus didáctico-pedagógico, continúan en el foco de atención los métodos de enseñanza tradicionales que, pese a las frecuentes advertencias, siguen sin presentar un marco epistemológico suficiente para abordar los desafíos climáticos. Más aún, como expresa Beach (2023) en su estudio seminal, los docentes carecen de una preparación que concuerde con la actual crisis climática. Esto, a decir de dos colectivos de autores significativos (Cardeno *et al.*, 2023; López, 2023), no hace más que reforzar la idea de que los programas de formación docente deben interrelacionarse con el enfoque en cambio climático, opinión que concuerda con Amoakwa *et al.* (2024).

Afortunadamente, Valencia *et al.* (2023) describen un escenario prometedor al sugerir las bondades inherentes a la inteligencia artificial (IA) en las pedagogías con enfoque ambiental. Tales bondades son, a partir de la sistematización que realiza Caro *et al.* (2023), la planificación —y, en este caso, la personalización— automática del

aprendizaje y su asociación casi causal con la adaptación a las necesidades específicas de cada receptor del conocimiento. A partir de ello, Ahmad *et al.* (2021) y Zapata *et al.* (2024) evidencian que estas aplicaciones favorecen, de forma innegable, el abordaje basado en evidencia y la práctica sostenida de los desafíos pedagógicos que se observan como resultado de la falta de adaptación a métodos de enseñanza divergentes.

En función de una conceptualización teórico-fáctica, la IA se define, por los autores de este estudio y como producto de una sistematización de los contenidos de Morandín-Ahuerma (2022), Suryawanshi y Singh (2024) y Shah (2024), como la capacidad que tienen los sistemas de cómputo para llevar a cabo tareas o acciones que, hasta el momento, siempre habían requerido de la inteligencia humana. En los contextos educativos, objeto de esta investigación, debe recalcarse el aporte de Nuryana *et al.* (2024) y Wani *et al.* (2024). Estos autores expresan que la aplicación de estas bondades tecnológicas produce, de manera proporcional, una mejora de la sostenibilidad y la salud, debido al monitoreo persistente de parámetros y métricas ambientales en tiempo real. Además, los sistemas de Inteligencia Artificial de las Cosas pueden mejorar las experiencias de aprendizaje, involucrar a los estudiantes y optimizar los entornos educativos mediante el monitoreo de la salud de la planta, el CO₂, la intensidad de la luz y la temperatura, así como mediante la detección de la presencia e interacciones humanas, como lo demostraron Tabuenca *et al.* (2023) en su estudio.

Hasta este punto, y a pesar del creciente interés en la educación ambiental sustentada en aportes de tecnologías basadas en IA, aún persisten importantes desafíos en la literatura académica. Tal es el caso que las herramientas de gestión de residuos con *machine learning* han demostrado reducir la distancia, el coste y el tiempo de transporte, al tiempo que mejoran la identificación de residuos, la pirólisis, la estimación de las emisiones de carbono y la conversión de energía en las ciudades inteligentes (Fang *et al.*, 2023; Huang y Koroteev, 2021; Thao, 2023); sin embargo, no existen investigaciones que aborden de manera integral el impacto pedagógico de estas tecnologías.

Además, persisten en la literatura preocupaciones éticas no resueltas sobre el uso de la IA en la educación ambiental. Esto plantea un debate complejo en la comunidad científica, ya que el propio desarrollo y uso de la IA contribuyen, por sí mismos, a problemas ambientales, incluido el aumento de las emisiones de carbono, los desechos electrónicos y la injusticia ambiental, como advierte Zhuk (2023). Por tanto, Donati *et al.* (2022) señalan que los organismos internacionales encargados

del cuidado del medioambiente deben crear comités internos para monitorear las aplicaciones de IA, promover esfuerzos transdisciplinarios y determinar la infraestructura y la gobernanza óptimas con el fin de minimizar los efectos no deseados y reducir las brechas digitales.

Precisamente por esta razón, este capítulo busca abordar estos vacíos y cuestiones poco estudiadas mediante una revisión sistemática de las intersecciones actuales entre la IA y la educación ambiental. Con ello, los autores se proponen realizar una síntesis de las evidencias empíricas que emergen en la literatura sobre las aplicaciones educativas de la IA en la sostenibilidad. Además, se pretende identificar las limitaciones teóricas y metodológicas en la literatura reciente para proponer un marco conceptual que sirva como base para la comunidad científica.

En opinión de los autores, la relevancia de esta investigación radica en su potencial para orientar políticas públicas y educativas, así como estrategias tecnológicas que tengan como propósito promover de forma activa una mayor alfabetización ambiental digital. Por tanto, los autores del presente estudio plantean como objetivo general analizar el impacto de la IA en la mejora de las pedagogías ambientales en los últimos años.

Fundamentación teórica

Marcos conceptuales e intersecciones entre constructos

La IA, adaptada y aplicada específicamente en contextos educativos —y en función de las salvedades producidas por Enrique (2023), corroboradas en la literatura (véase, por ejemplo, Bozkurt *et al.*, 2021; Hamal *et al.*, 2022; Ng *et al.*, 2022; Xu y Ouyang, 2021)—, cuenta con el aprendizaje automático y el procesamiento de lenguaje natural como motores impulsores de este neoaprendizaje enfocado en la mejora de la educación ambiental.

Asimismo, Fatima (2023) conceptualiza la educación con enfoque y direccionalidad ambientalista como aquella que, en su quehacer cotidiano, estudia las interacciones que emergen de los marcos relacionales entre sistemas naturales y humanos. Esta conceptualización se ve complementada por Tian *et al.* (2024), quienes sintetizan su propósito al enmarcarla dentro de una rama de la pedagogía centrada en formar una comunidad global enraizada en sólidos conocimientos medioambientales y sensibilizada ante sus problemas inherentes (Sanabria, 2022; Sánchez *et al.*, 2024a; Shutaleva, 2023).

Lo planteado en párrafos anteriores amerita, de acuerdo con el orden lógico-teórico de este estudio, un análisis detallado sobre la integración de la IA en la educación con enfoque ambientalista. Dicha integración es denominada por Moreira y Reis Fonseca (2024) como una transformación en las prácticas cotidianas de desarrollo del proceso pedagógico de apropiación del conocimiento, especialmente en lo relacionado con lo que estos autores denominan “desafíos ecológicos contemporáneos”.

Tal es el caso que, en la educación superior, Sajja *et al.* (2023) demostraron que los asistentes de IA reducen de forma estadísticamente significativa la carga cognitiva en los estudiantes. Con ello, directa e indirectamente, mejoran sus resultados de aprendizaje, compromiso y satisfacción con estas plataformas tecnológicas. Ejemplo de esto lo constituye la plataforma Smart-Learning Partner que, según publican Niu *et al.* (2022) en el contexto oriental —específicamente en China—, apoya las interacciones que conllevan la recepción y apropiación del conocimiento. No obstante, advierten estos autores, todavía se requieren interfaces sencillas y accesibles, así como la aplicación de principios de aprendizaje basados en la teoría de la conducta para reforzar conductas socialmente significativas.

Además, los *chatbots* de IA, como AsasaraBot, pueden enseñar eficazmente a los estudiantes de secundaria contenidos culturales en un idioma extranjero, como el inglés o el francés, mientras estos aprenden la lengua, según publican Mageira *et al.* (2022). Asimismo, una plataforma educativa Web 3.0 que utiliza vídeos de realidad virtual, pagos con criptomonedas y *chatbots* de IA puede revolucionar el sector educativo al hacer que el aprendizaje sea más accesible, atractivo y personalizado (Salomi *et al.*, 2023).

Adicionalmente, los modelos predictivos y la simulación de escenarios ecológicos constituyen, en la literatura científica contemporánea, otra aplicación significativa de las bondades de la IA en la educación ambiental (Gonzales *et al.*, 2023). Estos modelos de realidad virtual han demostrado facilitar la exploración de las consecuencias de diversas acciones y decisiones sobre el medio ambiente, lo que ha otorgado a sus usuarios una mejor comprensión de los sistemas ecológicos (Han *et al.*, 2023). En este escenario, Ye (2023) y Gómez y Sánchez (2023) plantean que la IA y la tecnología de simulación virtual interactiva reducen eficazmente el consumo de energía y mejoran la eficiencia energética en los edificios, sin sacrificar las condiciones del entorno habitable o laboral.

De manera similar, las tecnologías de análisis de *big data* han demostrado mejorar significativamente el monitoreo ambiental al abordar la creciente necesidad de una detección atmosférica precisa y promover su uso generalizado (Chen *et al.*, 2021; Gómez *et al.*, 2024). De acuerdo con Ekundayo *et al.* (2022), el *big data* puede optimizar la gestión de recursos y la sostenibilidad ambiental al permitir la toma de decisiones informadas a través de análisis avanzados, aprendizaje automático y sistemas de monitoreo en tiempo real. Por tanto, estas herramientas de análisis de datos basadas en IA pueden transformar la toma de decisiones medioambientales al posibilitar estrategias proactivas mediante la detección temprana de problemas y modelos predictivos mejorados (Ncube y Ngulube, 2024).

Perspectivas de investigación y desafíos actuales

En la medida en que la IA logre integrarse de forma sinérgica en la educación ambiental, se hace cada vez más necesario un análisis crítico de las limitaciones, tanto técnicas como pedagógicas, que pueden afectar su implementación efectiva en contextos educativos, como indican Roman-Acosta *et al.* (2023). A pesar de su probado potencial para transformar los procesos de enseñanza mediante métodos innovadores de aprendizaje, la adopción de tecnologías basadas en IA se enfrenta a desafíos significativos que requieren análisis por parte de la comunidad científica.

En primer lugar, entre las limitaciones técnicas a las que se hacía referencia se encuentra la necesidad de una infraestructura adecuada, como el acceso a internet de alta velocidad y a dispositivos compatibles, que muchas veces no están disponibles en determinados contextos educativos (Higuera, 2022). En este sentido, Moosa Panjwani (2024) señala que las tecnologías de IA mejoran significativamente la participación de los estudiantes y los resultados de aprendizaje en la educación en ciencias de la computación; sin embargo, la infraestructura limitada, la insuficiente financiación y la escasa capacitación del personal continúan como barreras para su adopción generalizada (Gârdan *et al.*, 2025; Borges y González, 2022; Wang, 2024). Por tanto, el empleo de la IA en la educación es prometedor; no obstante, desafíos como el uso inadecuado, los cambios de roles y los problemas sociales y éticos requieren una mayor colaboración entre educadores e ingenieros de IA (Celik, 2022; Lampou, 2023; Tan *et al.*, 2024; Zhai *et al.*, 2021).

Por otro lado, no pueden ignorarse las preocupaciones y consideraciones éticas asociadas al empleo y aplicación de la IA. En este sentido, Huang *et al.* (2023) señalan

que los problemas éticos asociados con la IA incluyen la filtración de información privada, la discriminación, el desempleo y los riesgos de seguridad. Además, de acuerdo con Stahl *et al.* (2023), las tecnologías relacionadas con la IA pueden plantear cuestiones éticas y de derechos humanos, como la privacidad, los prejuicios y la discriminación, la seguridad, la distribución económica, la participación política o la naturaleza cambiante de la guerra.

Asimismo, las disparidades en el acceso a las tecnologías y a la información, que generan brechas digitales, limitan la participación de los estudiantes en currículos de educación ambiental basados en IA. Especialmente en los países en vías de desarrollo, la brecha digital en la educación superior está impulsada por la asequibilidad, las limitaciones de infraestructura y la escasa alfabetización digital, lo que afecta la participación de los estudiantes y su rendimiento académico, de acuerdo con la investigación conducida por Assefa *et al.* (2024). Además, según Afzal *et al.* (2023), la brecha digital en la educación afecta el acceso de los estudiantes a la tecnología y sus resultados educativos, con variaciones en el acceso a internet según los grupos de edad, las zonas rurales y urbanas, el género y los antecedentes socioeconómicos.

En consecuencia, aunque existen estudios que demuestran aplicaciones efectivas de la IA en el aprendizaje (Dogan *et al.*, 2023; Stamenković *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024), no se ha logrado evaluar de manera suficiente el impacto de estas en el comportamiento proambiental y la conciencia ecológica de los receptores de este conocimiento. Esto, en opinión de los autores, puede limitar la comprensión de cómo estas herramientas pueden influir en la formación de patrones comportamentales y actitudes sostenibles a mediano y largo plazo.

Metodología

Este estudio emplea una metodología de revisión sistemática conforme a la normativa *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (Prisma) (Page *et al.*, 2020, 2021). La revisión se centró en analizar las aplicaciones de la IA en la educación ambiental.

En esta investigación se establecieron los siguientes objetivos específicos, que complementan el objetivo general planteado anteriormente:

1. Identificar las principales herramientas y metodologías de IA aplicadas en la educación ambiental en los últimos años.

- 2. Analizar el impacto de dichas herramientas y metodologías en el aprendizaje, la sensibilización sobre los problemas ambientales y la adopción crítica de comportamientos sostenibles en el cuidado del medio ambiente.
- 3. Evaluar las limitaciones y vacíos persistentes en la literatura científica contemporánea que podrían constituir futuras líneas de investigación en este campo de estudio.

Criterios de inclusión y exclusión

Los estudios considerados en esta revisión sistemática debieron cumplir criterios de inclusión y exclusión preestablecidos. En este sentido, se asumieron parámetros basados en el marco PICO (población, intervención, comparación, resultados y diseño) (Stark y Woods, 2022), como se refleja en la tabla 1.

Adicionalmente, como criterios de exclusión se descartaron los artículos publicados fuera del período 2020-2024. Asimismo, no se tuvieron en cuenta investigaciones que mencionaran la IA de forma indirecta o tangencial, sin aplicaciones o resultados concretos en la educación ambiental. También fueron omitidas aquellas investigaciones que no hubieran sido revisadas por pares, tales como conferencias sin indexación, informes técnicos no publicados en revistas académicas, memorias de eventos y reportajes de ONG u organismos nacionales e internacionales.

Tabla 1. Criterios de inclusión empleados a partir de parámetros PICO

Enfoque PICO	Criterios de inclusión
Población	Estudios que involucren estudiantes, educadores, comunidades o público en general, siempre que se inserten en el contexto de la educación ambiental y muestren el empleo de herramientas tecnológicas basadas en IA.
Intervención	Estudios que utilicen herramientas de IA en la educación ambiental (aprendizaje automático, chatbots, monitores digitales, sistemas de recomendación y análisis de datos para la personalización del aprendizaje).
Comparación	Estudios que comparen enfoques tradicionales de educación ambiental o perspectivas pedagógicas con métodos basados en el uso de IA en contextos educativos.
Resultados	Medición de cambios en conocimiento, actitudes o comportamientos proambientales.

Diseño del estudio

Investigaciones empíricas (con enfoques cuantitativos, cualitativos o mixtos), revisiones sistemáticas y metaanálisis.

Estrategia de búsqueda

Se consultaron las siguientes bases de datos y fuentes de información de primer nivel: PubMed, Scopus y Web of Science. Estas plataformas fueron seleccionadas por su amplia cobertura de literatura científica, de acuerdo con las recomendaciones de investigaciones previas (véase, por ejemplo, Afraz *et al.*, 2024; Stuart y Petersen, 2022; Ortega y Delgado-Quirós, 2024).

En cuanto a los términos de búsqueda, se empleó la siguiente fórmula: (“Artificial Intelligence” OR “AI” OR “Machine Learning”) AND (“Environmental Education” OR “Sustainability Education” OR “Eco-Literacy” OR “Climate Awareness”) AND (“applications” OR “tools” OR “projects” OR “case studies” OR “technology”).

Además, se aplicaron filtros por año (2020-2024), tipo de documento (artículos empíricos y revisiones) e idioma (español e inglés). Adicionalmente, se realizó una búsqueda manual en Google Scholar para asegurar la identificación de estudios relevantes no indexados en Scopus.

Proceso de selección de estudios

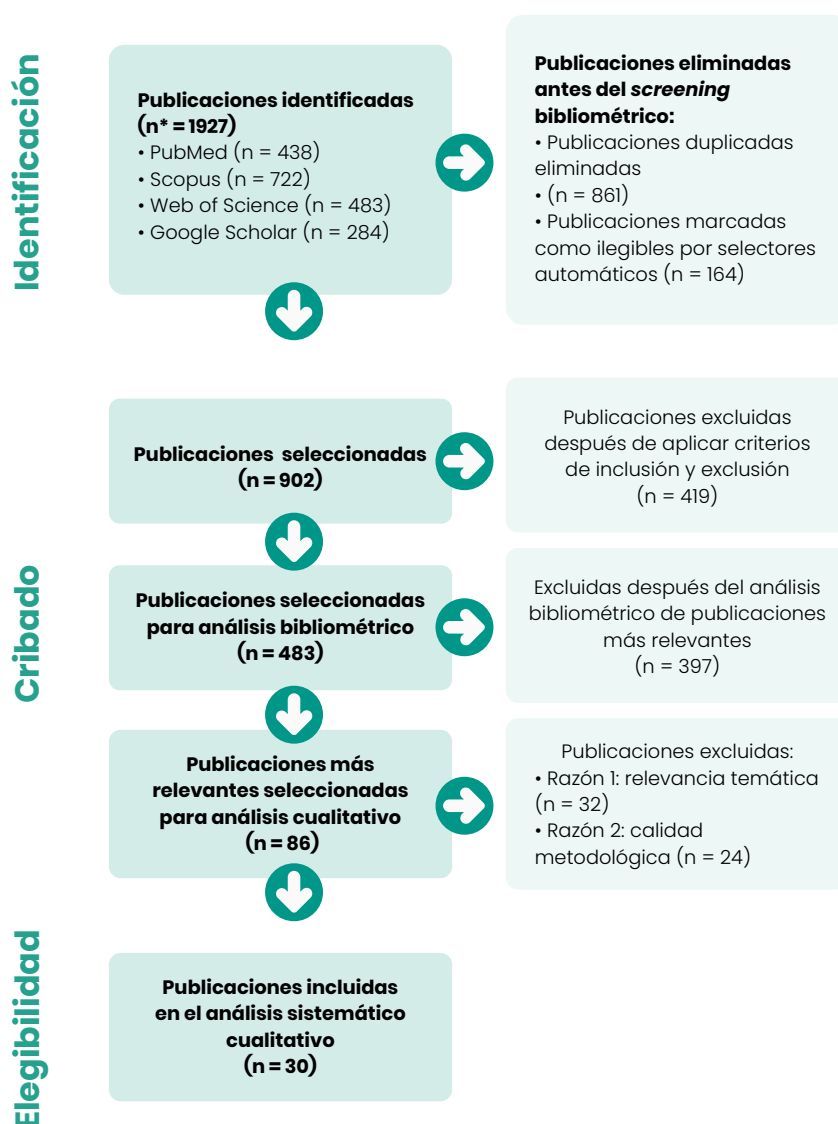
Se siguió el diagrama de selección de estudios recomendado en las directrices Prisma (véanse las figuras 1 y 2) (Page *et al.*, 2020, 2021). Para seleccionar los textos, los autores se apoyaron en los criterios de inclusión y exclusión descritos en la sección anterior.

En un primer momento, se realizó una búsqueda en PubMed, Scopus, Web of Science y Google Scholar. Se identificó un total de 1927 estudios a partir de esta búsqueda inicial. Se utilizó el *software* EndNote para gestionar las referencias, eliminar duplicados (861) y descartar publicaciones marcadas como ilegibles por selectores automáticos (164). Esta herramienta facilitó la organización de los estudios y permitió un seguimiento eficiente de las decisiones tomadas. Tras la eliminación de estos registros, quedaron 902 estudios.

Durante la etapa cuantitativa se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos, lo que condujo a la eliminación de 419 publicaciones. Se

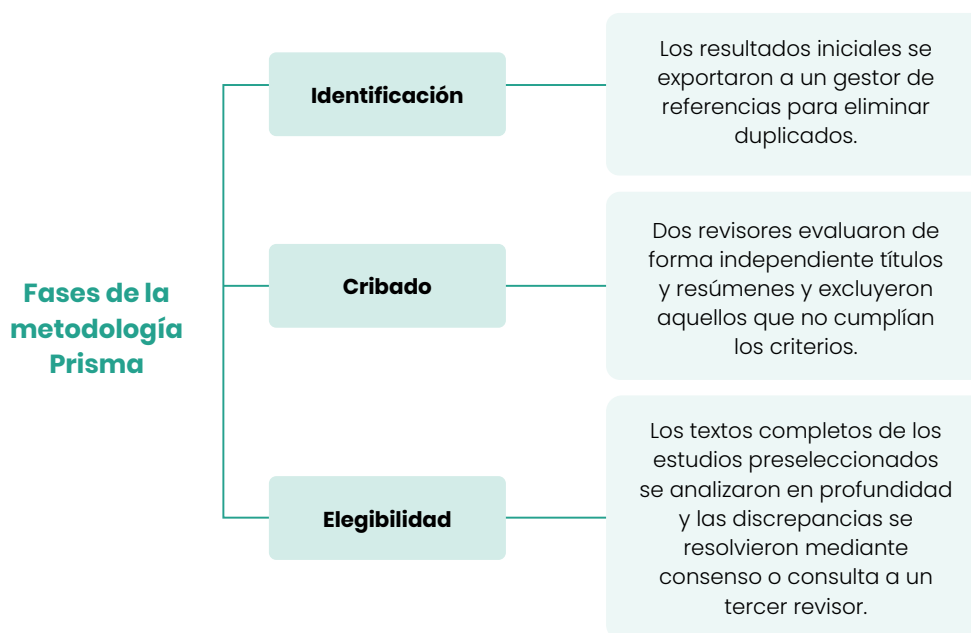
revisaron los títulos y resúmenes de los 483 estudios restantes para determinar su relevancia con respecto a los objetivos del análisis bibliométrico. Posteriormente, en la etapa cualitativa, se seleccionaron 86 investigaciones para el análisis cualitativo mediante unidades de contenido temático. Finalmente, tras eliminar 32 estudios por falta de relevancia temática y 24 por insuficiente calidad metodológica, se retuvieron 30 investigaciones para el análisis sistemático cualitativo.

Figura 1. Diagrama de flujo de acuerdo con la metodología Prisma para la selección de estudios



Nota: * n = número de publicaciones. Elaboración propia a partir de “The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews”, por Page *et al.*, 2020, *Journal of Clinical Epidemiology*, 134 y “PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews”, por Page *et al.*, 2021, *BMJ*, 372.

Figura 2. Fases de la selección de estudios de acuerdo con la metodología Prisma



Nota: elaboración propia a partir de “The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews”, por Page *et al.*, 2020, *Journal of Clinical Epidemiology*, 134 y “PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews”, por Page *et al.*, 2021, *BMJ*, 372.

Selección y evaluación de la calidad de los estudios

En la presente investigación se seleccionaron dos investigadores con experiencia en la redacción y publicación de revisiones sistemáticas, quienes evaluaron los estudios de manera independiente. En una primera fase, revisaron únicamente los títulos y resúmenes de los artículos identificados en los motores de búsqueda seleccionados. La mayoría de los estudios se seleccionaron por consenso; las discrepancias se resolvieron mediante discusión entre los investigadores, con la mediación de los autores del presente estudio. En caso de no alcanzarse acuerdo, se estableció como protocolo recurrir a un tercer investigador neutral para dirimir la decisión.

Para la aplicación de criterios de calidad en la selección de los estudios se emplearon indicadores bibliométricos complementados con una evaluación cualitativa del contenido. En primer lugar, se evaluó el número de citaciones de los estudios como indicador de influencia en la comunidad científica. Asimismo, se analizó el índice h de los autores y el factor de impacto de las revistas para complementar las métricas de calidad.

Los autores decidieron priorizar revistas con cuartiles altos (Q1-Q3), por lo que las revistas ubicadas en Q4 fueron descartadas sistemáticamente por su menor factor de impacto. No obstante, para evitar la exclusión de estudios relevantes debido a métricas bajas de las revistas en que se publicaron, los investigadores realizaron una revisión cualitativa de su metodología y principales resultados. En caso de discrepancia, se recurrió a la verificación de las métricas de impacto en Scimago Journal Rank, con preferencia por métricas normalizadas por año.

Extracción y análisis de datos

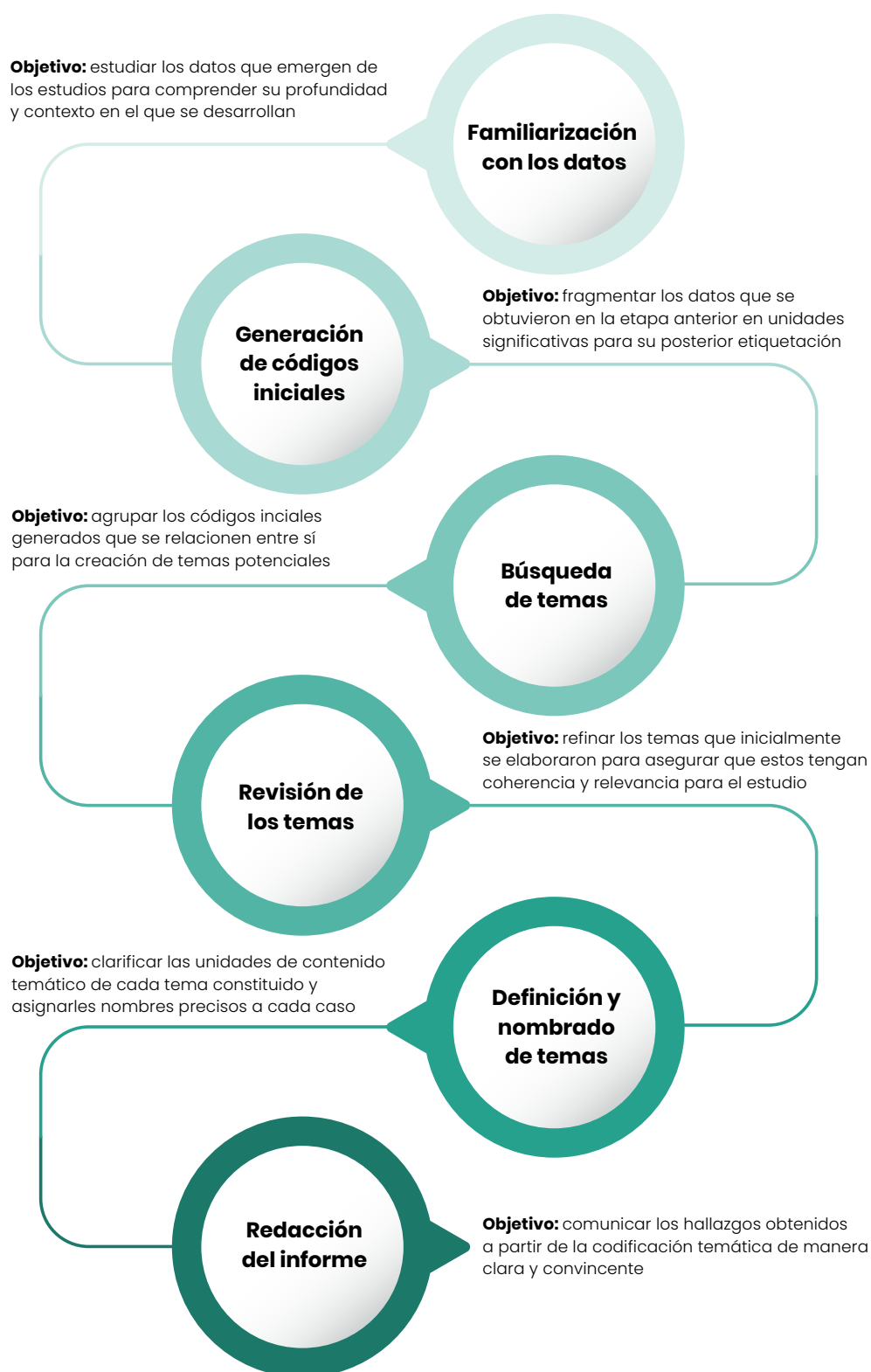
Se empleó Bibliometrix para la extracción y análisis de datos. Esta es una herramienta de código abierto en R que simplifica el análisis de mapeo científico complejo mediante la integración de diversas herramientas de *software* y el soporte de un flujo de trabajo recomendado (Aria y Cuccurullo, 2017; Ledesma y Malave, 2022; Sánchez *et al.*, 2024b). De acuerdo con Moral-Muñoz *et al.* (2020), Bibliometrix permite realizar análisis bibliométricos detallados y resulta fundamental en investigaciones que requieren un análisis cuantitativo de la literatura revisada, ya que facilita la identificación de tendencias, patrones y relaciones entre los estudios incluidos.

Los estadísticos empleados incluyeron medidas descriptivas de las métricas de publicación, autoría, citas y colaboraciones. Además, se desarrollaron análisis de la producción científica anual y del promedio de citas por año. Para ello, se consideró la media de citas por artículo y por año. Asimismo, se realizó un análisis de las fuentes de información más relevantes en función del número de publicaciones.

También se efectuó un análisis de redes temáticas a partir de la frecuencia de aparición de palabras clave en la literatura; este se complementó con un análisis tendencial de los principales temas consolidados como líneas de investigación. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de conglomerados en el que se agruparon clústeres temáticos según las métricas de centralidad y densidad de Callon, así como el *ranking* correspondiente y la frecuencia de los clústeres.

Además del análisis cuantitativo, se realizó un análisis cualitativo mediante análisis de contenido, de acuerdo con los seis pasos propuestos por Braun y Clarke (2006) (véase figura 3). Este enfoque de análisis temático reflexivo, según Byrne (2021), puede implementarse de manera efectiva en diversos contextos y temas de investigación, lo que contribuye a clarificar su posición entre las tipologías existentes de análisis temático.

Figura 3. Procesos de codificación temática cualitativa seguidos para el análisis de datos cualitativos



Nota: elaboración propia a partir de “Using thematic analysis in psychology”, por Braun y Clarke, 2006, *Qualitative Research in Psychology*, 3(2).

Análisis de resultados bibliométricos

La muestra final de documentos quedó conformada por 483 investigaciones extraídas de 286 fuentes (ver tabla 2). Se observa un crecimiento anual del 49.71 %, lo que constituye un indicador bibliométrico de una temática en auge dentro de la literatura científica. Asimismo, se registra un promedio de 11.47 citaciones por documento y un total de 19 180 referencias empleadas. De estos documentos, 76 son de autoría única, y existe un promedio de 4.54 coautores por documento. Además, la mayoría de las publicaciones corresponde a artículos científicos (415), y destaca la presencia de 16 *preprints*, lo que indica que los autores se mantienen actualizados y respaldan nuevas formas de presentación de resultados de investigación, de acuerdo con lo señalado por Díaz-Guerra y Hernández-Lugo (2023) sobre este tipo de publicaciones.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los metadatos

Información principales sobre los datos	Indicadores numéricos
Tiempo	2020:2024
Fuentes (revistas, libros, etc.)	286
Documentos	483
Crecimiento anual por año en porciento	49.71
Promedio de antigüedad por documento	2.18
Promedio de citaciones por documento	11.47
Total de referencias	19 180
Autores	2026
Documentos con un solo autor	76
Promedio de coautores por documentos	4.54
Porcentaje de coautorías internacionales	0
Cantidad de libros	4

Cantidad de capítulos de libros	48
Artículos	415
Preprints	16
Revisiones	1

Producción científica y evolución temporal

La producción científica en esta temática, de acuerdo con su evolución anual en el rango seleccionado, experimentó un notable crecimiento en los últimos años (véase tabla 3). En el año inicial (2020) se registraron 43 publicaciones, mientras que en el año de cierre del filtrado (2024) se contabilizaron 216. Esto evidencia un aumento exponencial del interés de la comunidad científica en la temática. Dicho auge coincide, en el panorama histórico-científico, con la consolidación de la IA en contextos educativos y con la creciente urgencia de la comunidad internacional por abordar las crisis ambientales cada vez más frecuentes.

Las citas por documento presentan una paradoja significativa. Aunque en 2020 se observa la menor cantidad de publicaciones (43), existe una media de 30.23 citas totales por artículo. En 2024, por el contrario, pese a registrarse 216 publicaciones, solo se observa una media de 3.43 citas totales por artículo. El promedio general de 11.47 citas por documento indica un impacto moderado de la producción científica, especialmente concentrado en los primeros años del período analizado. Esto podría sugerir una posible saturación temática o una migración del interés hacia otras intersecciones de estos constructos.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de la producción científica y evolución temporal de las investigaciones seleccionadas

Año de publicación	Cantidad de publicaciones	Media de citas totales por artículo	Numero de citas	Media de citas totales por año
2020	43	30.23	1300	5.04
2021	50	18.32	916	3.66
2022	73	18.15	1325	4.54

2023	101	12.48	1260	4.16
2024	216	3.43	741	1.72

Fuentes de producción científica y redes de colaboración

En cuanto a las fuentes de producción científica (véase tabla 4), se observa que las revistas con mayor número de publicaciones son *Sustainability* (21 artículos), *Environment, Development and Sustainability* (18) y *Environmental Science and Pollution Research International* (18). A partir de los nombres y enfoques de estas revistas, se identifica un claro énfasis en la sostenibilidad y la protección del medio ambiente. Sin embargo, en los textos consultados se constató que la colaboración internacional es nula (como se muestra en la tabla 2).

Tabla 4. Principales fuentes de producción científica de los datos consultados

Fuentes de producción científica	Cantidad de artículos
Sustainability	21
Environment, Development and Sustainability	18
Environmental Science and Pollution Research International	18
Education and Information Technologies	16
Humanities and Social Sciences Communications	11
Journal of the Knowledge Economy	11
Scientific Reports	11
Environmental Monitoring and Assessment	8
Discover Sustainability	5
Postdigital Science and Education	5

Por otro lado, la alta densidad de coautoría (véase figura 4), con un promedio de 4.54 autores por documento, indica que las redes académicas son activas a nivel institucional. Asimismo, se observa que las principales instituciones con mayor producción en esta temática son Beijing Normal University (7 publicaciones), National Taiwan University (5), Chinese Academy of Sciences (5) y Central China Normal University (5) (véase figura 5).

Figura 4. Análisis de densidad de redes de coautorías

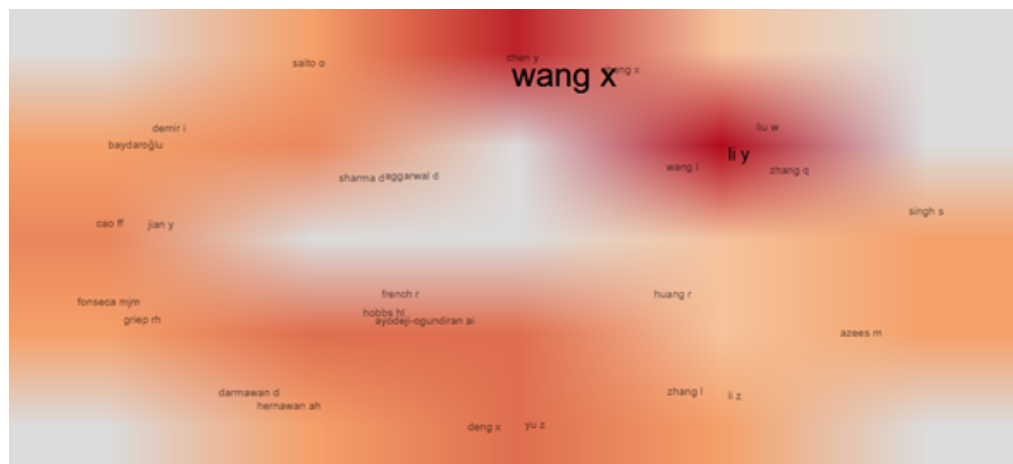
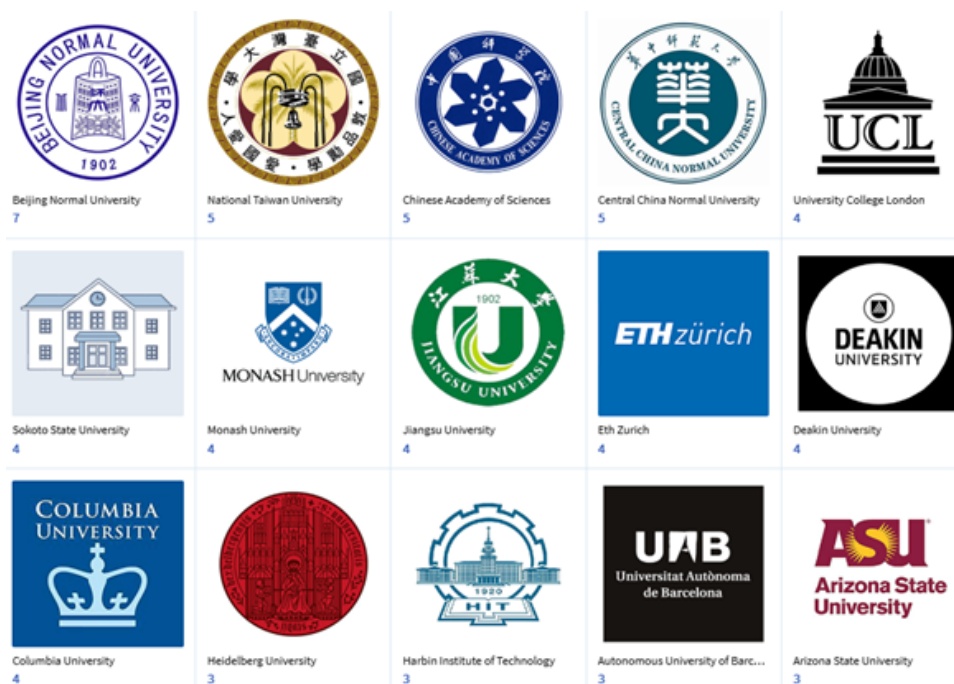


Figura 5. Universidades que mayores producciones de investigaciones científicas presentan



2024; Bates *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2020; Kamalov *et al.*, 2023), aunque en este caso con énfasis en problemáticas ecológicas.

Tabla 5. *Frecuencia de aparición de las 10 principales palabras claves en la literatura consultada*

Palabras claves	Frecuencia de aparición
sustainability	7
artificial intelligence	6
machine learning	6
higher education	5
climate change	4
bibliometric analysis	3
carbon emission	3
digital transformation	3
education	3
human capital	3

Por otra parte, un tercer eje temático lo constituye “higher education”, con una frecuencia de 5. Este eje identifica a las universidades como espacios idóneos para la innovación pedagógica en educación ambiental mediante la incorporación de herramientas de IA. Ahmad *et al.* (2022) señalan que el uso de IA en la educación mejora el aprendizaje estudiantil, reduce la carga laboral del profesorado y apoya tareas administrativas, lo que permite mayor concentración en la enseñanza y la orientación académica. No obstante, en el conteo de palabras clave no se encuentran referencias explícitas a otros niveles educativos, salvo el término “education” en novena posición (frecuencia 3), lo que suscita interrogantes sobre la aplicación de la IA en pedagogías ambientales en otros niveles de enseñanza.

Tabla 6. *Análisis de temáticas que actualmente se encuentran como tendencias de investigación*

Término	Frecuencia	Año (Q1)	Año (media)	Año (Q3)
sustainability	7	2022	2023	2023
machine learning	6	2020	2023	2024
higher education	5	2023	2023	2023
artificial intelligence	6	2023	2024	2024

Clústeres emergentes en la literatura científica

Con el propósito de identificar las principales agrupaciones en la literatura que abordan la intersección entre IA y educación ambiental, se realizó un análisis de clústeres bibliométricos. Este análisis permitió estructurar el conocimiento de forma estratificada y organizar temáticamente la producción científica (véanse figuras 7a y 7b, y tabla 7). De acuerdo con Bilgili y Sheu (2022), este tipo de análisis ofrece perspectivas sobre la manera en que los estudios se relacionan entre sí para formar corrientes de investigación coherentes.

En el caso particular de esta investigación, el núcleo central de la red lo constituye el clúster “artificial intelligence & sustainability”, con un indicador de centralidad de 0.529. Su posición dominante sugiere un rol articulador en el campo de estudio, en tanto la literatura respalda que tecnologías avanzadas como la IA, la cadena de bloques, el *big data* y el IoT pueden fortalecer los sistemas de gestión medioambiental y mejorar la sostenibilidad en diversos sectores e industrias (Sira, 2024).

De forma similar, el clúster “machine learning”, con una densidad de 16 667, indica un desarrollo consolidado en aplicaciones científicas concretas. Este foco se manifiesta principalmente en el desarrollo de algoritmos para la medición precisa de la huella ecológica (Espoir *et al.*, 2024; Janković *et al.*, 2020; Roumiani *et al.*, 2022), la optimización de recursos energéticos y la modelización predictiva

de impactos ambientales (Afroz y Raghutla, 2024; Awan *et al.*, 2022; Mohsin *et al.*, 2021). Estos resultados corroboran que las técnicas de aprendizaje automático están transformando los enfoques cuantitativos en la educación ambiental.

Tabla 7. Métricas de clasificación de los clústeres a partir del análisis temático de conglomerados

Clústeres	Métrica de centralidad de Callon	Métrica de densidad de Callon	Ranking de centralidad	Ranking de densidad	Frecuencia del clúster
medical education	0.167	50 000	9	6	5
carbon emission	0.000	81 019	4	11	14
sustainability	0.529	38 492	12	2	18
machine learning	0.181	16 667	10	1	6
digital economy	0.000	62 500	4	10	4
multivariate analysis	0.000	50 000	4	6	2
artificial intelligence	0.033	109 217	8	12	30
citizen science	0.000	50 000	4	6	2
CO ₂	0.000	50 000	4	6	2
google earth engine	0.000	50 000	4	6	2

Por otra parte, el clúster “digital economy”, con una frecuencia de 4, se configura como un área emergente. Este clúster conecta las políticas educativas verdes con los avances en transformación digital. Aunque su frecuencia es menor en comparación con otros, sugiere una tendencia en crecimiento, dado su potencial para impulsar modelos educativos ambientalmente sostenibles. En este sentido, Cao y Peng (2023) y Karlilar *et al.* (2023) señalan que la economía digital puede promover la calidad ambiental al optimizar la estructura industrial y fomentar la innovación tecnológica.

Figura 7a. Clasificación de los clústeres en función del grado de relevancia y desarrollo temático

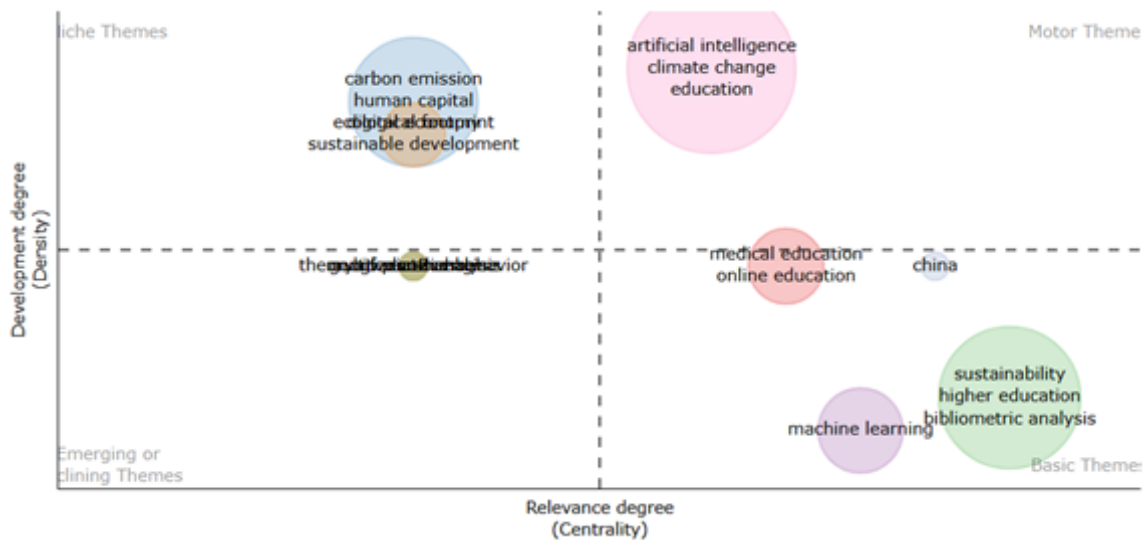
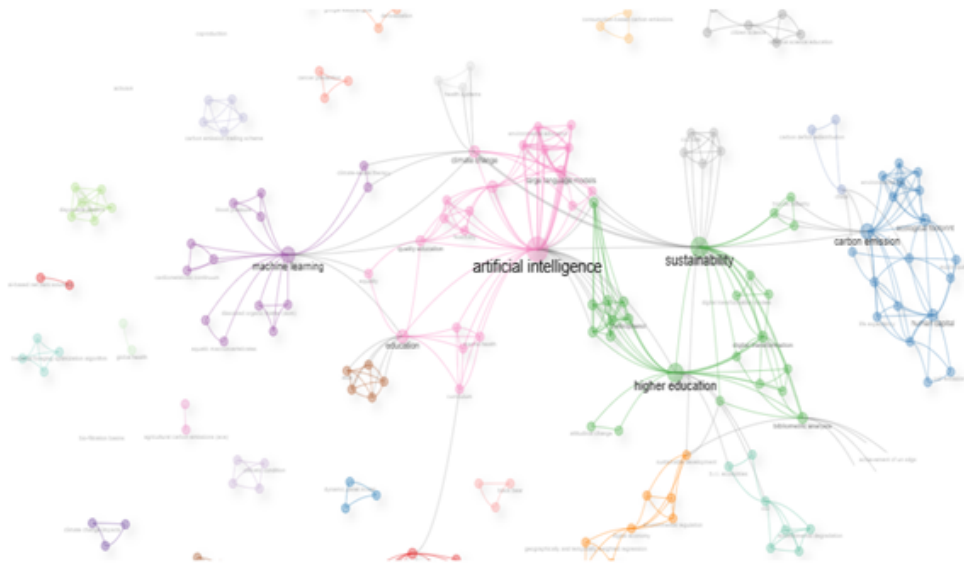


Figura 7b. Mapa de redes de intersección entre los clústeres identificados en el análisis de conglomerados



Discusión crítica de las unidades de contenido temático cualitativas

Pedagogías basadas en inteligencia artificial para la educación ambiental

Una tendencia reiterada en la literatura científica consultada en este estudio es el papel de las pedagogías basadas en IA y sus aplicaciones en la educación

ambiental. Con base en ello, Chen *et al.* (2020) refieren que el empleo de la IA en la educación ha mejorado significativamente la administración, la instrucción y el aprendizaje, al incrementar la eficiencia, fomentar la retención de estudiantes y optimizar la personalización del plan de estudios (Alam y Mohanty, 2023).

Tapalova y Zhiyenbayeva (2022) y Yim y Su (2024) enfatizan en su estudio que la IA en la educación puede mejorar las rutas de aprendizaje personalizadas al proporcionar capacitación las 24 horas del día, los 7 días de la semana, adaptar el contenido a las necesidades personales, ofrecer retroalimentación en tiempo real y optimizar el proceso educativo. Además, existe evidencia sólida recabada por Chaturvedi *et al.* (2023) que señala que las simulaciones basadas en IA en la educación mejoran la comprensión, la participación y la empleabilidad de los estudiantes, ya que permiten contenido multisensorial, comunicación sincrónica e incorporación de ejemplos de la industria del mundo real.

Hasta este punto, se ha enfatizado que las pedagogías basadas en IA en la educación son prometedoras; sin embargo, Gerdes *et al.* (2024) advierten que se necesita más investigación para optimizar su integración con otras estrategias pedagógicas. Esto corrobora lo planteado por Memarian y Doleck (2024), quienes señalan que la pedagogía de la IA en la educación superior, como tendencia reiterada en esta revisión, enfrenta desafíos y requiere mayor investigación sobre los objetivos de aprendizaje, las habilidades de pensamiento y las actividades necesarias para avanzar en la alfabetización en estas tecnologías.

Particularmente, la integración de la educación y la cultura ambiental en la modernización digital puede mejorar la comprensión y la participación del público en la solución de los problemas ambientales (Karagachev, 2024). Por ejemplo, el programa de educación sobre el medio ambiente ecológico basado en *Novel Engineering* que emplean Kim y Kim (2024) tuvo un impacto positivo en la competencia ambiental y en la conciencia sobre la IA de los estudiantes de primaria.

Herramientas tecnológicas para la educación ambiental

Otra tendencia importante en este estudio es el empleo de herramientas tecnológicas en el cuidado del ecosistema y en la educación ambiental. Específicamente, los datos digitales en línea de las plataformas de medios de comunicación pueden complementar los esfuerzos de seguimiento de la biodiversidad e integrarse en los conjuntos de datos actuales, como se propone en el Marco Mundial de Biodiversidad de Kunming-Montreal (Soriano-Redondo *et al.*, 2024).

En este sentido, las aplicaciones del *big data* en la educación ambiental ayudan a los estudiantes a analizar datos complejos, identificar patrones y correlacionar sistemas biológicos, lo que, de acuerdo con Orazbek *et al.* (2024), mejora las habilidades analíticas y fomenta la preparación para abordar los desafíos modernos relacionados con la biodiversidad y el desarrollo sostenible (Francisco, 2023; McClure *et al.*, 2020; Panda *et al.*, 2024). De manera similar a lo expuesto en el párrafo anterior, también existe un relativo consenso en la literatura sobre el uso de experiencias inmersivas en las pedagogías ambientales. Estas tecnologías de realidad virtual, a decir de Sahabuddin y Makkasau (2024), han demostrado favorecer la mejora del conocimiento, las actitudes y los comportamientos proambientales de los estudiantes universitarios (Aguayo y Eames, 2023; Cho y Park, 2023).

Sin embargo, Petersen *et al.* (2020) advierten que la capacitación previa a las excursiones de realidad virtual inmersiva puede mejorar el rendimiento en las pruebas de transferencia en la educación sobre el cambio climático. Además, de acuerdo con Rawson *et al.* (2022) y Gross *et al.* (2023), la realidad virtual de baja inmersión también puede mejorar eficazmente las experiencias de aprendizaje a distancia en línea para los estudiantes de gestión ambiental, con resultados positivos y potencial para futuras adaptaciones.

Integración de la inteligencia artificial al currículo de la educación ambiental

Hasta este punto se ha enmarcado la importancia de las pedagogías basadas en IA y de las herramientas más empleadas en la educación ambiental. Sin embargo, aún no queda claro cómo se integran estas bondades de la IA en los currículos de la educación ambiental como tendencia teórica de esta revisión. En este sentido, remarcan Rojas y Chiappe (2024) que los ecosistemas digitales y la IA en la educación pueden mejorar la personalización del aprendizaje, pero requieren una implementación efectiva a través de redes, aplicaciones, servicios y usuarios. Tal es el caso que Ayeni (2024) señala que la integración de la IA en la enseñanza de las ciencias ambientales puede dar lugar a lecciones más dinámicas e interesantes, adaptadas a las necesidades individuales de los estudiantes, lo que podría mejorar los métodos de enseñanza y acelerar su aprendizaje.

Por otro lado, complementar el currículo educativo de las ciencias ambientales con las bondades que ofrece la IA ha demostrado poder fomentar soluciones sostenibles a desafíos como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y el agotamiento de los recursos, lo que exige conocimientos interdisciplinarios,

de acuerdo con Akter (2024). En este sentido, ya existen en la literatura modelos formales que personalizan las rutas de aprendizaje mediante la integración de la IA en la planificación instructiva. Sin embargo, su complementación también plantea preocupaciones éticas, ya que requiere un rediseño curricular y estrategias para asegurar el aprendizaje continuo, como indican Abulibdeh *et al.* (2024) y Caro *et al.* (2023). Esta advertencia se ve corroborada por Henriksen *et al.* (2024), quienes también enfatizan que integrar la IA en la educación para la sostenibilidad puede promover el cuidado ambiental mediante la exploración creativa, pero también presenta desafíos como preocupaciones ambientales y éticas.

A pesar de estas preocupaciones, existe un relativo consenso en la literatura en que la IA en la educación superior revolucionará el aprendizaje en materia de sostenibilidad, al fomentar estilos de aprendizaje emancipadores y mejorar la variedad y adaptabilidad ocupacional (Bonini, 2020; Fan *et al.*, 2023). Incluso, el Plan Mundial de Desarrollo Educativo para construir una educación sostenible basada en IA enfatiza en sus postulados que esta puede mejorar la personalización del aprendizaje, el desarrollo del currículo adaptativo y la evaluación y seguimiento del progreso de los estudiantes (Kamalov *et al.*, 2023; Marisa *et al.*, 2024).

Conclusiones

En este estudio se destacan de forma sistémica las interacciones entre la IA y la educación con enfoque en el desarrollo de conciencia ambiental. Además, en opinión de los autores, el principal aporte de esta investigación es el resalte de las herramientas basadas en IA y su aplicación en contextos educativos a través de plataformas interactivas, modelos predictivos y análisis de *big data*.

Por otro lado, se remarcan los desafíos inherentes a la complementación de ambos sistemas, especialmente en lo referido a la capacitación docente y al cierre de brechas. Una recomendación importante que se desprende de esta investigación es que integrar la IA en los currículos de educación ambiental no es suficiente si no se hace de manera estratégica. Esto, en opinión de los autores, incluye asegurar que los docentes cuenten con las competencias tecnológicas y pedagógicas necesarias para realizar dicha tarea.

Referencias

Abulibdeh, A., Zaidan, E. y Abulibdeh, R. (2024). Navigating the Confluence of Artificial Intelligence and Education for Sustainable Development in the Era

- of Industry 4.0: Challenges, Opportunities, and Ethical Dimensions. *Journal of Cleaner Production*, 437, 140 527. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140527>
- Afanador, N. (2023). Historia de la producción y sus retos en la era actual. *Región Científica*, 2(1), 202 315. <https://doi.org/10.58763/rc202315>
- Afraz, A., Chashmyazdan, M., Khajouei, R. y Bagherinezhad, Z. (2024). Literature Searches in Medical Informatics Systematic Reviews: Suggested Approaches. *Medical Reference Services Quarterly*, 44, 17-30. <https://doi.org/10.1080/02763869.2024.2429066>
- Afroz, S. y Raghutla, C. (2024). Do Various Financial Resources Ensure Renewable Energy Production and Environmental Protection in OECD Countries: Modelling for Insight. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 58 562–58 580. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34995-z>
- Afzal, A., Khan, S., Daud, S., Ahmad, Z. y Butt, A. (2023). Addressing the Digital Divide: Access and Use of Technology in Education. *Journal of Social Sciences Research*, 3(2), 883-895. <https://doi.org/10.54183/jssr.v3i2.326>
- Aguayo, C. y Eames, C. (2023). Using Mixed Reality (XR) Immersive Learning to Enhance Environmental Education. *The Journal of Environmental Education*, 54(1), 58–71. <https://doi.org/10.1080/00958964.2022.2152410>
- Ahmad, K., Iqbal, W., El-Hassan, A., Qadir, J., Benhaddou, D., Ayyash, M. y Al-Fuqaha, A. (2024). Data-Driven Artificial Intelligence in Education: A Comprehensive Review. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 17, 12–31. <https://doi.org/10.1109/TLT.2023.3314610>
- Ahmad, S., Alam, M., Rahmat, M., Mubarik, M. y Hyder, S. (2022). Academic and Administrative Role of Artificial Intelligence in Education. *Sustainability*, 14(3), 1101. <https://doi.org/10.3390/su14031101>
- Ahmad, S., Rahmat, M., Mubarik, M., Alam, M. y Hyder, S. (2021). Artificial Intelligence and Its Role in Education. *Sustainability*, 13(22), 12 902. <https://doi.org/10.3390/su132212902>
- Akter, M. (2024). Interdisciplinary Insights: Integrating Artificial Intelligence with Environmental Science for Sustainable Solutions. *Journal of Artificial Intelligence General Science*, 1(1). <https://doi.org/10.60087/jaigs.vii.28>
- Alam, A. y Mohanty, A. (2023). Educational Technology: Exploring the Convergence of Technology and Pedagogy Through Mobility, Interactivity, AI, and Learning Tools. *Cogent Engineering*, 10(2), 2 283 282. <https://doi.org/10.1080/23311916.2023.2283282>
- Amoakwa, A., Asante, G., Bentil, S. y Nipah, S. (2024). Climate Change Education in Basic Schools: The Educators' Lens on Techniques and Challenges.

- International Journal of Research and Innovation in Social Science*, 8(2), 1012-1024. <https://doi.org/10.47772/ijriss.2024.802071>
- Aria, M. y Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-Tool for Comprehensive Science Mapping Analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Assefa, Y., Gebremeskel, M., Moges, B., Tilwani, S. y Azmera, Y. (2024). Rethinking the Digital Divide and Associated Educational In(equity) in Higher Education in the Context of Developing Countries: The Social Justice Perspective. *The International Journal of Information and Learning Technology*, 42(1), 15-32. <https://doi.org/10.1108/ijilt-03-2024-0058>
- Awan, A., Kocoglu, M., Banday, T. y Tarazkar, M. (2022). Revisiting Global Energy Efficiency and CO₂ Emission Nexus: Fresh Evidence from the Panel Quantile Regression Model. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 47 502–47 515. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19101-5>
- Ayeni, M. (2024). Teaching science education in an era of artificial intelligence. *European Journal of Computer Science and Information Technology*, 12(5), 36-42. <https://doi.org/10.37745/ejcsit.2013/vol12n53642>
- Bates, T., Cobo, C., Mariño, O. y Wheeler, S. (2020). Can artificial intelligence transform higher education? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 17. <https://doi.org/10.1186/s41239-020-00218-x>
- Beach, R. (2023). Addressing the challenges of preparing teachers to teach about the climate crisis. *The Teacher Educator*, 58(4), 507–522. <https://doi.org/10.1080/08878730.2023.2175401>
- Bilgili, H. y Sheu, C. (2022). A bibliometric review of the mathematics journal. *Mathematics*, 10(5), 2701. <https://doi.org/10.3390/math10152701>
- Bonini, P. (2020). When tomorrow comes: Technology and the future of sustainability learning in higher education. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 62(4), 39–48. <https://doi.org/10.1080/00139157.2020.1764300>
- Borges, A. Y. y González, Y. L. (2022). Educación comunitaria para un envejecimiento activo: Experiencia en construcción desde el autodesarrollo. *Región Científica*, 1(1), 202 212. <https://doi.org/10.58763/rc202213>
- Bozkurt, A., Karadeniz, A., Bañeres, D., Guerrero-Roldán, A. y Rodríguez, M. (2021). Artificial intelligence and reflections from educational landscape: A review of AI studies in half a century. *Sustainability*, 13(2), 800. <https://doi.org/10.3390/sui3020800>
- Braun, V. y Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp0630a>

- Byrne, D. (2021). A worked example of Braun and Clarke's approach to reflexive thematic analysis. *Quality & Quantity*, 56, 1391–1412. <https://doi.org/10.1007/s11335-021-01182-y>
- Cao, Z. y Peng, L. (2023). The impact of digital economics on environmental quality: A system dynamics approach. *SAGE Open*, 13(4). <https://doi.org/10.1177/21582440231219350>
- Cardeno, N., Cardeno, E. J. y Bonilla, E. (2023). Las TIC y la transformación académica en las universidades. *Región Científica*, 2(2), 202–370. <https://doi.org/10.58763/rc202370>
- Caro, M., Quitian, L., Giraldo, J. y Lengua-Cantero, C. (2023). A formal model for personalized learning path using artificial intelligence for instructional planning with a focus on 21st-century skills and environmental awareness. En *2023 IEEE Colombian Caribbean Conference (C3)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/C358072.2023.10436195>
- Celik, I. (2022). Towards intelligent-TPACK: An empirical study on teachers' professional knowledge to ethically integrate artificial intelligence (AI)-based tools into education. *Computers in Human Behavior*, 138, 107–468. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107468>
- Chaturvedi, I., Cambria, E. y Welsch, R. (2023). Teaching simulations supported by artificial intelligence in the real world. *Education Sciences*, 13(2), 187. <https://doi.org/10.3390/educsci13020187>
- Chen, L., Chen, P. y Lin, Z. (2020). Artificial intelligence in education: A review. *IEEE Access*, 8, 75–264–75–278. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988510>
- Chen, Y., Ren, F., Wang, S. y Zhang, L. (2021). Application of big data analysis technology in environmental monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 632, 052–017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/632/5/052017>
- Cho, Y. y Park, K. (2023). Designing immersive virtual reality simulation for environmental science education. *Electronics*, 12(2), 315. <https://doi.org/10.3390/electronics12020315>
- Díaz-Guerra, D y Hernández-Lugo, M. (2023). ¿Está obsoleta la comunicación científica tradicional? Un análisis de las alternativas emergentes. *Opinión Pública*, (21), 55–63. <https://revistas.cun.edu.co/index.php/opinionpublica/article/view/1042/752>
- Díaz-López, C., Serrano-Jiménez, A., Chacartegui, R., Becerra-Villanueva, J., Molina-Huelva, M. y Barrios-Padura, Á. (2023). Sensitivity analysis of trends in environmental education in schools and its implications in the built environment. *Environmental Development*, 45, 100–795. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100795>

- Dogan, M., Dogan, T. y Bozkurt, A. (2023). The use of artificial intelligence (AI) in online learning and distance education processes: A systematic review of empirical studies. *Applied Sciences*, 13(5), 3056. <https://doi.org/10.3390/app13053056>
- Donati, F., Dente, S., Li, C., Vilaysouk, X., Froemelt, A., Nishant, R., Liu, G., Tukker, A. y Hashimoto, S. (2022). The future of artificial intelligence in the context of industrial ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 26(4), 1175–1181. <https://doi.org/10.1111/jiec.13313>
- Ekundayo, T., Omotoyosi, F. y Awofala, T. (2022). Leveraging big data for environmental sustainability and resource management. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 16(3), 1196–1202. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.16.3.1327>
- Espoir, D., Sunge, R., Nchofoung, T. y Alola, A. (2024). Analysing the drivers of ecological footprint in Africa with machine learning algorithm. *Environmental Impact Assessment Review*, 104, 107 332. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107332>
- Fan, Z., Yan, Z. y Wen, S. (2023). Deep learning and artificial intelligence in sustainability: A review of SDGs, renewable energy, and environmental health. *Sustainability*, 15(18), 13 493. <https://doi.org/10.3390/su151813493>
- Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A., Farghali, M., Ihara, I., Hamza, E., Rooney, D. y Yap, P. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21, 1959–1989. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01604-3>
- Fatima, S. (2023). The learning approach: Environmental education and ethics. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 5(4). <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2023.v05i04.7349>
- Francisco, M. (2023). Artificial intelligence for environmental security: National, international, human and ecological perspectives. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 61, 101 250. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101250>
- Gârdan, I., Manu, M., Gârdan, D., Negoită, L., Paștiu, C., Ghiță, E. y Zaharia, A. (2025). Adopting AI in education: Optimizing human resource management considering teacher perceptions. *Frontiers in Education*, 10. <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1488147>
- Gerdes, M., Bayne, A., Henry, K., Ludwig, B., Stephenson, L., Vance, A., Wessol, J. y Winston, S. (2024). Emerging artificial intelligence-based pedagogies in didactic nursing education: A scoping review. *Nurse Educator*, 50(1), 7–17. <https://doi.org/10.1097/NNE.0000000000001746>
- Gómez, C. A., Pérez, A. y Sánchez, V. (2024). Análisis de la producción científica en torno a ODS 11: ciudades y comunidades sostenibles. *Mundo FESC*, 14(28), 118–136. <https://doi.org/10.61799/2216-0388.1585>

- Gómez, C. y Sánchez, V. (2023). Systematic review on augmented reality in health education. *Gamification and Augmented Reality*, 1, 28. <https://doi.org/10.56294/gr202328>
- Gonzales, Y. M., Quintanilla, L. y Pérez, A. J. (2023). Metaverse and education: A complex space for the next educational revolution. *Metaverse Basic and Applied Research*, 2, 56. <https://doi.org/10.56294/mr202356>
- González, R. (2023). La transversalidad del medioambiente: Facetas y conceptos teóricos. *Región Científica*, 2(2), 202 393. <https://doi.org/10.58763/rc202393>
- Gross, F., Petersen, L., Wallmeier, C., Barrett, R., Kwasnitschka, T. y Karstens, S. (2023). From coastal geomorphometry to virtual environments. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1229489>
- Hamal, O., Faddouli, N., Harouni, M. y Lu, J. (2022). Artificial intelligence in education. *Sustainability*, 14(5), 2862. <https://doi.org/10.3390/su14052862>
- Han, B., Varshney, K., LaDeau, S., Subramaniam, A., Weathers, K. y Zwart, J. (2023). A synergistic future for AI and ecology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(38), e2 220 283 120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2220283120>
- Henriksen, D., Mishra, P. y Stern, R. (2024). Creative learning for sustainability in a world of AI: Action, mindset, values. *Sustainability*, 16(11), 4451. <https://doi.org/10.3390/su16114451>
- Higuera, E. L. (2022). Aspectos clave en agroproyectos con enfoque comercial: Una aproximación desde las concepciones epistemológicas sobre el problema rural agrario en Colombia. *Región Científica*, 1(1), 20 224. <https://doi.org/10.58763/rc20224>
- Huang, C., Zhang, Z., Mao, B. y Yao, X. (2023). An overview of artificial intelligence ethics. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 4(4), 799–819. <https://doi.org/10.1109/TAI.2022.3194503>
- Huang, J. y Koroteev, D. (2021). Artificial intelligence for planning of energy and waste management. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101 426. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101426>
- Janković, R., Mihajlović, I., Strbac, N. y Amelio, A. (2020). Machine learning models for ecological footprint prediction based on energy parameters. *Neural Computing and Applications*, 33, 7073–7087. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05476-4>
- Kamalov, F., Calonge, D. y Gurrib, I. (2023). New era of artificial intelligence in education: Towards a sustainable multifaceted revolution. *Sustainability*, 15(16), 12 451. <https://doi.org/10.3390/su151612451>

- Karagachev, V. (2024). Environmental education and culture in the context of digital modernization. *State and Municipal Management Scholar Notes*, 1(1), 307–312. <https://doi.org/10.22394/2079-1690-2024-1-1-307-312>
- Karlilar, S., Balcılar, M. y Emir, F. (2023). Environmental sustainability in the OECD: The power of digitalization, green innovation, renewable energy and financial development. *Telecommunications Policy*, 47(6), 102 568. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2023.102568>
- Kim, B. y Kim, H. (2024). Impact of novel engineering-based ecological environmental education program on elementary school students' environmental competency and attitude toward using artificial intelligence. *The Korean Association of Practical Arts Education*, 37(2), 187–206. <https://doi.org/10.24062/kpae.2024.37.2.187>
- Kovari, A., András, I. y Rajcsányi-Molnár, M. (2024). The role of AI in ecohumanistic education. *Journal of Ecohumanism*, 3(3), 1361–1370. <https://doi.org/10.62754/joe.v3i3.3606>
- Lampou, R. (2023). The integration of artificial intelligence in education: Opportunities and challenges. *Review of Artificial Intelligence in Education*, 4, e15. <https://doi.org/10.37497/rev.artif.intell.educ.v4i00.15>
- Ledesma, F. y Malave, B. E. (2022). Patrones de comunicación científica sobre e-commerce: Un estudio bibliométrico en la base de datos Scopus. *Región Científica*, 1(1), 202 214. <https://doi.org/10.58763/rc202214>
- López, Y. Y. (2023). Competencia digital del profesorado para las habilidades TIC en el siglo XXI: Una evaluación de su desarrollo. *Región Científica*, 2(2), 2 023 119. <https://doi.org/10.58763/rc2023119>
- Mageira, K., Pittou, D., Papasalouros, A., Kotis, K., Zangogianni, P. y Daradoumis, A. (2022). Educational AI chatbots for content and language integrated learning. *Applied Sciences*, 12(7), 3239. <https://doi.org/10.3390/app12073239>
- Marisa, S., Gunawan, G. y Susilawati, E. (2024). Global education development plan to build sustainable education based on artificial intelligence. *Qubahan Academic Journal*, 4(2), 38-46. <https://doi.org/10.48161/qaj.v4n2a207>
- McClure, E., Sievers, M., Brown, C., Buelow, C., Ditria, E., Hayes, M., Pearson, R., Tulloch, V., Unsworth, R. y Connolly, R. (2020). Artificial intelligence meets citizen science to supercharge ecological monitoring. *Patterns*, 1(7), 100 109. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2020.100109>
- Memarian, B. y Doleck, T. (2024). Teaching and learning artificial intelligence: Insights from the literature. *Education and Information Technologies*, 29, 21 523–21 546. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12679-y>
- Mohsin, M., Kamran, H., Nawaz, M., Hussain, M. y Dahri, A. (2021). Assessing the impact of transition from nonrenewable to renewable energy consumption on

- economic growth–environmental nexus from developing Asian economies. *Journal of Environmental Management*, 284, III 999. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.III999>
- Moosa Panjwani, M. (2024). Impact of AI in teaching and learning of CS in low-resourced schools. *International Journal of Science and Research Archive*, 12(2), 1933–1939. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.12.2.1451>
- Moral-Muñoz, J. A., Herrera-Viedma, E., Santisteban-Espejo, A. y Cobo, M. J. (2020). Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review. *El Profesional de la Información*, 29(1), e290 103. <https://doi.org/10.3145/epi.2020.ene.03>
- Morandín-Ahuerma, F. (2022). What is artificial intelligence? *International Journal of Research Publication and Reviews*, 3(12), 1947-1951. <https://doi.org/10.55248/gengpi.2022.31261>
- Moreira, A. D. J. y Reis Fonseca, R. M. (2024). La inserción de los movimientos sociales en la protección del medio ambiente: Cuerpos y aprendizajes en el Recôncavo da Bahia. *Región Científica*, 3(1), 2 024 208. <https://doi.org/10.58763/rc2024208>
- Ncube, M. y Ngulube, P. (2024). Enhancing environmental decision-making: A systematic review of data analytics applications in monitoring and management. *Discover Sustainability*, 5. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00510-0>
- Ng, D., Lee, M., Tan, R., Hu, X., Downie, J. y Chu, S. (2022). A review of AI teaching and learning from 2000 to 2020. *Education and Information Technologies*, 28, 8445–8501. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11491-w>
- Niu, S., Luo, J., Niemi, H., Li, X. y Lu, Y. (2022). Teachers' and students' views of using an AI-aided educational platform for supporting teaching and learning at Chinese schools. *Education Sciences*, 12(12), 858. <https://doi.org/10.3390/educsci12120858>
- Nuryana, Z., Nurcahyati, I., Ichsan, Y., Kurniawan, M., Hanafiah, Y., Fadhlurrahman, F., Rachmaningtyas, N. y Aji, A. (2024). Exploring the frontiers of school environmental health and artificial intelligence for sustainability. *E3S Web of Conferences*, 501, 01 014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450101014>
- Orazbek, A., Amanbaeva, M. y Fiel'Ardh, K. (2024). Digitization of education in biology: Application of artificial intelligence tools in the course “Biodiversity and sustainable development goals”. *Bulletin of the Natural and Geographical Sciences Series*, 82(4). <https://doi.org/10.51889/3005-6217.2024.82.4.004>
- Ortega, J. y Delgado-Quirós, L. (2024). The indexation of retracted literature in seven principal scholarly databases: A coverage comparison of Dimensions,

- OpenAlex, PubMed, Scilit, Scopus, The Lens and Web of Science. *Scientometrics*, 129, 3769–3785. <https://doi.org/10.1007/s11192-024-05034-y>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Journal of Clinical Epidemiology*, 134, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2021.03.001>
- Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... McKenzie, J. E. (2020). PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n160. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- Panda, R., Dash, P. y Roy, P. (2024). A novel web-based approach for monitoring biodiversity. *Ecology and Evolution*, 14(10), e70364. <https://doi.org/10.1002/ece3.70364>
- Petersen, G., Klingenberg, S., Mayer, R. y Makransky, G. (2020). The virtual field trip: Investigating how to optimize immersive virtual learning in climate change education. *British Journal of Educational Technology*, 51, 2098–2114. <https://doi.org/10.31234/osf.io/m7vp9>
- Rawson, R., Okere, U. y Tooth, O. (2022). Using low-immersive virtual reality in online learning: Field notes from environmental management education. *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 23(4), 211–221. <https://doi.org/10.19173/irrodl.v23i4.6475>
- Rojas, M. y Chiappe, A. (2024). Artificial intelligence and digital ecosystems in education: A review. *Technology, Knowledge and Learning*, 29, 2153–2170. <https://doi.org/10.1007/s10758-024-09732-7>
- Roman-Acosta, D., Caira-Tovar, N., Rodríguez-Torres, E. y Pérez-Gamboa, A. J. (2023). Effective leadership and communication strategies in disadvantaged contexts in the digital age. *Salud, Ciencia y Tecnología – Serie de Conferencias*, 2, 532. <https://doi.org/10.56294/sctconf2023532>
- Roumiani, A., Shayan, H., Sharifinia, Z. y Moghadam, S. (2022). Estimation of ecological footprint based on tourism development indicators using neural networks and multivariate regression. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 33 396–33 418. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24471-x>
- Sahabuddin, E. y Makkasau, A. (2024). Utilization of virtual reality as a learning tool to increase students' pro-environmental behavior at universities: A maximum