

¿Qué impactos ocasiona el uso de la inteligencia artificial?

Explorando sus implicaciones ambientales

What Impacts Does the Use of Artificial Intelligence Have? Exploring Its Environmental Implications

Recibido: 15 Septiembre de 2024

Aprobado: 23 Diciembre de 2024

Cómo citar: G. D. Cortes-Dussan, A. P. . Araméndiz-Mendez, and L. N. . Medina-Velandia, "¿Qué impactos ocasiona el uso de la inteligencia artificial? Explorando sus implicaciones ambientales", *Mundo Fesc*, vol. 15, no. 31, 2025, doi: 10.61799/2216-0388.1739.

Germán Duglas Cortés-Dussán*



Magister en Investigación Social Interdisciplinaria,
cortisdussan@gmail.com, gdcortisd@unimonserate.edu.co;
<https://orcid.org/0000-0002-6058-5958>,
Fundación Universitaria Monserrate, Bogotá, Colombia.

Amine Paola Araméndiz-Mendez²



Candidata a Doctora en Educación,
aaramendizm@ecci.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0002-6901-7973>,
Universidad ECCI, Bogotá, Colombia.

Lucy Nohemy Medina-Velandia³



Candidata a Doctora en Educación,
lunome@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-2871-4991>,
Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, Colombia.

*Autor para correspondencia:

cortisdussan@gmail.com



¿Qué impactos ocasiona el uso de la inteligencia artificial? Explorando sus implicaciones ambientales

Resumen

La Inteligencia Artificial (IA) se presenta actualmente como una aliada poderosa a nivel productivo, incluso tiene el potencial de apoyar procesos, reduciendo desperdicios y mejorando la eficiencia energética. Sin embargo, la IA impacta negativamente la naturaleza, ya que, requiere una cantidad considerable de recursos energéticos e hídricos, lo cual afecta significativamente la salud de los seres humanos, los seres vivos y la integridad de los ecosistemas. Por ende, este artículo tiene por objetivo determinar los impactos ambientales que genera el uso de la Inteligencia Artificial. Como aporte metodológico, se parte desde el método mixto, que se apoyó en una revisión documental a diferentes bases de datos, medios de divulgación y de información científica. Los resultados de esta investigación sugieren que el uso de la IA puede tener tanto impactos positivos como negativos en el ambiente. Por un lado, la IA puede apoyar la economía, efectuando tareas operativas, analizando o respaldando áreas como: educación, agricultura, producción manufacturera, turismo. En contraste, se destacan claras preocupaciones que impactan negativamente, tales como: transformaciones en las profesiones y cambios en la fuerza laboral, excesivo uso de energía, alto consumo de agua que lleva a la desaparición de ecosistemas y pérdida de biodiversidad. En ese orden de ideas, es necesario reflexionar, divulgar e implementar estas tecnologías de manera consciente y que minimicen sus impactos ambientales. Esto incluye desarrollar estrategias de uso responsable de la IA, exigir en la innovación en el diseño eficiente de centros de datos, así como la inversión en energías renovables y participar en el desarrollo de políticas que regulen el impacto ambiental de la tecnología, y por supuesto, llevar esta conversación al ámbito cotidiano.

Palabras clave: Abastecimiento de energía, Agua, Cibernética, Medio ambiente, Problema mundial.

What Impacts Does the Use of Artificial Intelligence Have? Exploring Its Environmental Implications

Keywords: Cybernetics, Energy Supply, Environment, Global Issue, Water.

Abstract

Artificial Intelligence (AI) is currently presented as a powerful ally at the productive level, and even has the potential to support processes, reducing waste and improving energy efficiency. However, AI has a negative impact on nature, as it requires a considerable amount of energy and water resources, which significantly affects the health of humans, living beings and the integrity of ecosystems. Therefore, this article aims to determine the environmental impacts generated by the use of Artificial Intelligence. As a methodological contribution, it is based on the quantitative method, which was supported by a documentary review of different databases, media and scientific information. The results of this research suggest that the use of AI can have both positive and negative impacts on the environment. On the one hand, AI can support the economy, performing operational tasks, analyzing or supporting areas such as: education, agriculture, manufacturing production, tourism. In contrast, there are clear concerns that have a negative impact, such as: transformations in professions and changes in the workforce, excessive energy use, high water consumption that leads to the disappearance of ecosystems and loss of biodiversity. In this order of ideas, it is necessary to reflect, disseminate and implement these technologies in a conscious manner that minimizes their environmental impacts. This includes developing strategies for the responsible use of AI, demanding innovation in the efficient design of data centers, as well as investing in renewable energies and participating in the development of policies that regulate the environmental impact of technology, and of course, bringing this conversation to the everyday environment.

Introducción

Hoy por hoy, ya se ha ido normalizando el uso de la IA para el apoyo de tareas propias del proceso productivo, el ámbito comercial, del diseño, o incluso ya ha sido presentada como una herramienta potencialmente poderosa para abordar algunos de los desafíos más preocupantes del mundo: los de carácter climático [1].

En ese sentido, los sistemas de IA presentan una gran dicotomía en el ámbito ambiental, ya que, pueden ser grandes inspiradoras en la toma de decisiones y la gestión productiva que puede apoyar a la elaboración de proyectos, planes y procesos que propenden por la optimización en el uso de recursos, reducir desperdicios y mejorar la eficiencia energética. Lo cual, va en sintonía con lo Propuesto por la Organización de Naciones Unidas en los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), ya que, estas acciones apoyan notablemente al cumplimiento del ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico), el ODS 12 (Producción y consumo responsable).

Aquí se resalta que la aplicación de la IA no se limita al ámbito productivo, sino que, se ha extendido a diversos contextos: el escolar [3], [4], el investigativo [5], el político [6] e incluso el ocio y el entretenimiento [7]. En este último, por ejemplo, las personas generan imágenes o textos de forma recreativa, lo que ha facilitado la adopción gradual de esta tecnología en comunidades, que, a su vez, han contribuido a popularizar y masificar su uso.

Sin embargo, el uso de estas tecnologías no es intrínsecamente neutral o amigable con la naturaleza desde el punto de vista ambiental [1], [3]. El funcionamiento de la IA requiere una cantidad considerable de recursos energéticos e hídricos, para el funcionamiento adecuado de los centros de datos que requieren energía eléctrica para su funcionamiento, y necesitan de agua para los sistemas de refrigeración que dichos centros también necesitan. Lo cual, puede contraponerse directamente a los ODS: número 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS número 7 (Energía asequible y no contaminante) [2].

A su vez, el panorama en América Latina en relación a la IA, es que goza de gran popularidad e interés para su uso y difusión, pese a las grandes limitaciones con las que cuenta esta región, como la que menciona el informe del Banco Interamericano de Desarrollo [41] "El 60% de las escuelas rurales en Latinoamérica no tiene internet"[10], [11], [12], sin embargo, en Colombia se han generado acciones que pretenden transformar esta realidad por medio del documento CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social), donde el CONPES 3975 desde el año 2019 prioriza el uso de la IA en Colombia [43] y da lugar a la Resolución 1117 de 2022 expedida por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en Colombia [44], que proporciona los lineamientos para la transformación digital de ciudades y territorios en Colombia, logrando que desde estas acciones se acerque la sociedad en cuanto a la usabilidad de la IA, lo cual, lleva a

explorar el siguiente interrogante: ¿Qué relación existe entre la Inteligencia Artificial y el Ambiente?

Para dar respuesta a dicha pregunta, es importante resaltar, que para esta investigación se exploró el impacto ambiental de la IA estableciendo sus efectos negativos y beneficios. En ese sentido, se realizó una revisión documental que permitió analizar las complejas relaciones entre la IA, el ambiente y la sociedad, por ende, es necesario abordar los siguientes conceptos: IA, Ambiente e impacto ambiental.

La Inteligencia Artificial (IA) corresponde al diseño y desarrollo de sistemas informáticos que imitan la inteligencia humana [13], [14], [15], [16], ya que, “ofrece una serie de técnicas y herramientas que se utilizan habitualmente en las organizaciones modernas para generar conocimiento” [7], estos atributos, permiten la mejora de sus capacidades a medida que interactúan con el usuario [15], lo cual la hace llamativa y cuyo uso puede incorporarse a diversas áreas del desarrollo humano.

En consecuencia, es necesario abordar el concepto de Ambiente, el cual se refiere a las relaciones y el conjunto de condiciones donde interactúan aspectos biológicos, ecológicos, sociales, políticos, económicos, históricos, culturales e incluso tecnológicos [1], [17], [18], [19], [8], [9], en ese sentido, al incorporarse la dimensión tecnológica, se hace necesario abordar el concepto de impacto ambiental.

De acuerdo a lo enunciado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el Decreto 1076 de 2015 [42], define como impacto ambiental a cualquier tipo de alteración en el entorno natural comprendiendo lo biótico (flora, fauna, microorganismos, entre otros), lo abiótico (suelo, el agua, el aire, el clima, el paisaje, entre otros) [42], incluye el aspecto socioeconómico, patrimonio histórico o cultural y demás efectos sobre la vida humana, estos impactos pueden ser positivos o negativos y pueden ser adjudicados al desarrollo de una actividad, proyecto u obra [20], [21], [22].

En ese sentido, los impactos ambientales de la IA se clasifican en positivos y negativos según su efecto sobre los ecosistemas, recursos naturales o los organismos. Por un lado, los impactos positivos apoyan y aportan elementos necesarios para la conservación de los bienes ambientales (agua, aire) o los seres vivos [42], para el caso de la IA, estos incluyen la optimización del consumo energético, la predicción de fenómenos climáticos extremos y la mejora en la gestión de residuos mediante algoritmos de aprendizaje automático [48], [49].

Por otro lado, los impactos negativos son aquellas actividades que generan alteraciones que son un riesgo para la vida de los organismos o sus hábitats; para el caso de las IA, derivan principalmente del alto consumo energético de los modelos de entrenamiento, el uso intensivo de agua en centros de datos y la presión sobre ecosistemas debido a la extracción de minerales críticos [49], [50]. Estas externalidades son especialmente preocupantes en países en desarrollo, donde la infraestructura regulatoria y la

planificación ambiental aún son limitadas [50].

Aunado a lo expuesto anteriormente, hay que destacar que, en las cuatro últimas décadas el Planeta Tierra es cada vez más globalizado, a causa de la enorme utilidad que los seres humanos han provisto a los ordenadores y su conexión a internet que han logrado grandes avances a nivel tecnológico, comercial e incluso educativo. A su vez, la adopción e inclusión acelerada de la IA ofrece transformaciones revolucionarias en importantes renglones del desarrollo económico humano, incluyendo un par de sectores que atañe para esta reflexión: la gestión ambiental y la sostenibilidad. Sin embargo, el uso excesivo y esa creciente dependencia del Homo sapiens a las tecnologías avanzadas plantea una gran contradicción en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [2], especialmente aquellos centrados en la conservación ambiental y la gestión de recursos naturales.

Es por esto que, el presente trabajo contribuye a cerrar esta brecha al ofrecer (i) un análisis categorizado de los principales impactos ambientales positivos y negativos que implica el entrenamiento y el funcionamiento de los centros de datos en los que opera la IA, y (ii) se destacan algunas recomendaciones basadas en evidencia que se pueden tomar en cuenta para la formulación de insumos que puedan ser usados en la generación de política pública que armonice la agenda de los Objetivos de Desarrollo Sostenible [2] y el uso responsable de la IA.

Teniendo en cuenta dicho panorama, para el desarrollo de esta investigación se formuló la siguiente pregunta ¿Cuáles son los principales impactos ambientales negativos y positivos asociados al uso de la Inteligencia Artificial que ha sido reportados en la literatura entre 1994 a 2024?, esto permitió la identificación de correlaciones basadas en la revisión documental en diferentes medios de divulgación de información científica y académica como bases de datos, repositorios institucionales de Universidades destacadas en el ámbito de la IA.

Partiendo de lo anterior, se proyectó el siguiente objetivo general: Determinar los impactos ambientales positivos y negativos en cuanto al uso de recursos naturales como: energía, agua y materias primas; mediante análisis de frecuencia y co-ocurrencia de términos clave en publicaciones de alto impacto, comparando la evolución temporal de dichas categorías frente a hitos nacionales (políticas públicas [17], [43], [44]) e internacionales (como el Acuerdo de París 2015 [45], [46]).

Materiales y Métodos

Esta investigación usó el enfoque mixto, en la que se aplicó una revisión documental, combinando análisis cuantitativo y bibliométrico para identificar tendencias y patrones en la literatura con los Software: R y Bibloshiny, usando las bases de datos de Scopus [24] y Web of Science (WoS) [25], consultando los términos en inglés: Inteligencia Artificial,

Impactos Ambientales de la Inteligencia Artificial, Peligros de la Inteligencia Artificial, en la ventana de tiempo de los últimos treinta años (entre 1994 a 2024), [20].

En ese sentido, al abordarse dentro del Enfoque mixto se hizo necesario trabajar con datos cuantitativos que para esta investigación fueron las métricas bibliométricas, las cuales se analizan con técnicas estadísticas básicas [23], estos datos se complementaron con información de tipo cualitativo, la cual fue un análisis temático de textos que se examinaron mediante codificación y síntesis narrativa. La cual permite que a continuación, se describan las fases en las que se desarrolló la investigación:

Fase de Reconocimiento

Fase que permitió establecer tipos de documentos y cantidad, con lo que se procedió a construir la “Población documental inicial” [20], aquí la base de datos de Scopus [24] registró un total de 2.231 documentos relacionados con la temática de IA, y por su parte, WoS [25] registró un total de 1.238 resultados para las últimas 3 décadas, siendo un total de 3.469 documentos, de los cuales se tuvo que aplicar algunos criterios de exclusión [23], [31], [33].

Un primer criterio de exclusión seleccionado fue el criterio de “Saturación teórica” [23], [31], [33], donde la muestra elegida cubrió la diversidad de perspectivas sobre el tema [32], sin repetición de hallazgos clave, dónde el uso de los programas: R y BiblioShiny complementaron el análisis bibliométrico realizando mapeo de coautorías [35], redes de palabras clave y evolución temporal [38], principalmente de las dos bases de datos consultadas [24], [25].

Un segundo criterio de exclusión fue el de temáticas relacionadas donde se eliminaron los documentos que no correspondían con el tema de impactos ambientales (eliminándose documentos que presentaban temas de ciberseguridad, democracia, delitos informáticos, mercadeo y publicidad), usándose una muestra final de 415 documentos relevantes, siendo el 12% del total de documentos consultados que hablaban sobre el impacto ambiental de las IA en el planeta.

Estos 415 documentos fueron archivos con tipología de: Artículos científicos, libros, capítulos de libro, a los que se le sumaron 76 documentos con tipología de: informes institucionales, documentos de trabajo, trabajos de grado y tesis, que se obtuvieron de los repositorios institucionales de las páginas de la Biblioteca del Gobierno de Colombia, Ministerios Nacionales y Universidades tanto públicas como privadas a nivel nacional e internacional, teniendo en cuenta para ello el criterio de “selección a conveniencia” [23], identificando las universidad con mayor popularidad y reconocimiento en estándares internacionales en la temática de sistemas, informática y que tuvieran estudios relacionados con los impactos ambientales generados por la IA publicados en los últimos 30 años.

Fase de Categorización

En total se recopilaron 491 documentos, a los que se les generó un tratamiento estadístico donde se halló la ocurrencia de términos y temas dominantes [23], [31], posterior a ello, se analizaron datos por agrupaciones temáticas [23], [33], por medio de las matrices de análisis documental, se implementó el Diseño de Triangulación Concurrente (DITRIAC) [23] para desarrollar el proceso de categorización requerido para la investigación.

El DITRIAC, permite analizar la información en diferentes momentos, el primero de ellos fue el de contrastar en paralelo [23] los datos cualitativos y cuantitativos, en qué medida estos se complementan, confirman y amplían la información o si la contradicen.

Posterior a ello, viene un segundo momento que consiste en integrar, [23] que permite a partir de una matriz documental combinar, comparar, revisar y concluir en un sistema de categorías los principales hallazgos que emergen, para finalmente pasar al momento tres que se denomina: corroborar, [23] que para este caso, ya fue verificar si los hallazgos convergen dentro de las problemáticas sociales, ambientales y cómo ha sido su manejo desde algunos ámbitos: político, educativo, social e incluso económico. En la tabla 1, se observa la aplicación de estos momentos en la investigación.

En resumen, la técnica de DITRIAC, permitió identificar tendencias en cuanto a los impactos ambientales generados por la IA, cómo son abordados en la literatura existente y en el panorama investigativo actual de las Instituciones Educativas y entidades de Gobierno consultadas, para este propósito se usó la información obtenida en las redes de palabras clave y de evolución temporal [38], en donde se pudo contrastar los resultados de las bases de datos de Scopus y WoS con información de algunos repositorios institucionales, dando lugar a las distintas categorías (impactos ambientales positivos, impactos ambientales negativos, acciones de las comunidades frente a los impactos de la IA, recomendaciones que sugieren los investigadores), estas temáticas se exponen a continuación, en el apartado de resultados.

Tabla 1. Tabla resumen de la estrategia metodológica aplicada

Fase	Objetivo de la fase	Procedimientos / Actividades clave	Herramientas y fuentes	Criterios de inclusión-exclusión / Muestreo	Salida / Producto
1. Reconocimiento	Construir la población documental inicial y depurarla hasta un corpus relevante sobre impactos ambientales de la IA.	<ul style="list-style-type: none"> Búsqueda sistemática (1994-2024) en Scopus y WoS. Exportación y fusión de resultados. Exclusión por saturación teórica y pertinencia temática. 	R + Biblioshiny; Scopus (n=2 231) y WoS (n=1 238).	Saturación teórica; pertinencia temática (impactos ambientales).	Corpus depurado: 415 artículos (12 % de 3 469). Mapas de coautorías, redes de palabras clave.
	Complementar el corpus con evidencia institucional y académica no indexada (literatura gris).	<ul style="list-style-type: none"> Revisión dirigida en repositorios gubernamentales y universitarios (selección a conveniencia). 	Repositorios institucionales: gobiernos, ministerios, universidades.	Popularidad y reconocimiento internacional en IA/ sistemas; ≤ 30 años.	76 documentos adicionales (informes, tesis, etc.).

2. Categorización (DITRIAC)	Clasificar los 491 documentos finales y extraer patrones temáticos.	<ul style="list-style-type: none"> • Contrastar en paralelo: Estadística descriptiva de ocurrencia de términos. • Integrar: Matrices de análisis documental. • Corroborar: La aplicación del DITRIAC. 	R + Biblioshiny; redes de palabras clave y evolución temporal.	Agrupación temática automática y validación manual.	4 categorías emergentes: 1. impactos negativos, 2. positivos, 3. acciones comunitarias, 4. recomendaciones.
	Reconocer limitaciones sesgos y brechas del proceso.	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de restricciones idiomáticas, temporales y de acceso a datos privados. 			Declaración de limitaciones y agenda futura.

Fuente: Los autores. La tabla muestra de manera concreta las dos fases en que se dividió el proceso investigativo mostrando que las fases fueron transformándose de acuerdo a las necesidades del estudio enfocándose a nuevos objetivos.

Ahora bien, hay que destacar las limitaciones del estudio, una de ellas es el sesgo idiomático en la búsqueda de literatura, ya que se restringió a los idiomas inglés y español; a su vez, la consulta en repositorios fue generada por selección a conveniencia [23], teniendo en cuenta la popularidad de algunas universidades en el mundo a nivel de desarrollo de Software e inteligencia artificial, en adición, hay que tener en cuenta que la cobertura temporal de las últimas 3 décadas podrían omitirse avances recientes que no fueron indexados, teniendo en cuenta el creciente interés que la IA y el ambiente generan en el panorama actual. Y por último se resalta la exclusión de patentes privadas cuyos datos energéticos no son de acceso abierto.

Resultados y Discusión

Una vez realizado el análisis cuantitativo y bibliométrico fortalecido con la revisión documental es posible determinar algunos hallazgos entre los que se mencionan, que, en efecto, el uso de la IA genera Impactos Ambientales [42], que se clasifican como negativos o positivos, de acuerdo a las afectaciones (negativos) o las ventajas (positivos) que puede generar el uso e implementación de la IA en distintas actividades y sectores, ecosistemas o los seres vivos [20], [21], [22]. Los cuales se describen a continuación:

Impactos Ambientales Negativos

De esta manera, la clasificación que corresponde a los impactos ambientales negativos (afectaciones a ecosistemas o seres vivos [42], [20], [21], [22]), generados por la IA fue la más difícil de encontrar, ya que, pocos autores se atreven a exponer las claras preocupaciones que impactan negativamente al ambiente, las causas son el enorme vacío de conocimiento sobre este campo, no obstante, se resaltan los siguientes datos:

Del total de 415 documentos revisados, el 65 % cuantifica consumos energéticos; de estos, el 72 % reporta valores superiores a 500 MWh (Mega vatios por hora) por proceso de entrenamiento de la IA, con un máximo de 5,6 GWh (Giga vatios por hora) para modelos de lenguaje con más de 100 millones de parámetros. Por su parte, un 48% de los documentos señalan que la huella hídrica media estimada es de 78 m³ (metro cúbico)

por modelo; lo cual, es equivalente en el contexto colombiano al abastecimiento anual de agua potable para 104 personas en el país [25] - [33].

De acuerdo a lo explorado en los distintos análisis se presentan los siguientes hallazgos dispuestos en categorías, tales como:

Transformaciones en las profesiones y cambios en la fuerza laboral: La IA puede colocar en riesgo algunas profesiones, ya que, competiría directamente con la organización de tareas y aportaría significativamente en la toma de decisiones de las compañías, previéndose despidos masivos en algunos sectores económicos, impactando a la sociedad en los niveles de empleabilidad y productividad [25].

Uso excesivo de energía: Aquí, de nuevo se resalta la contribución de Portocarrero-Ramos [25] "el costo ambiental de la Inteligencia Artificial", y se adhiere el estudio desarrollado por la Universidad de Massachusetts en compañía con el Colegio de la Información y Ciencias de la Computación "Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP" [26] y el estudio "Energy and Policy Considerations for Modern Deep Learning Research" [27]. En los que exponen los altos costos energéticos de los centros de datos, que se relacionan en la Tabla II.

Tabla II. Impactos ambientales sobre el uso de energía en modelos de IA

Cantidad de modelos	Horas	Costo en la nube	Costo Eléctrico	Cálculo de emisiones de CO2/ libras	Cálculo de árboles para absorción
1	120	\$246064- \$828100	\$23.660	260	5.9
24	2880	\$5858216- \$19.898.06.00	\$558.376		
4789	239.942	\$ 487.396 - \$1.443.260	\$46.704.840	626.155	14.231

Fuente: [27] En la tabla se discrimina la estimación en costos y las emisiones generadas por la cantidad de horas y cuántos árboles se requieren para compensar dichas emisiones.

En ese sentido, se estima que la emisión media de dióxido de carbono (CO₂) por persona es de aproximadamente 4,3 toneladas al año, según cifras del Banco Mundial, [28]. Para compensar esta cantidad, una persona necesita plantar unos 165 árboles. Un árbol absorbe aproximadamente entre 10kg (kilogramo) y 30 Kg de CO₂ al año. Sin embargo, en promedio, se estima que un árbol adulto puede absorber alrededor de 22 kg (0.022 toneladas) de CO₂ al año, al establecer la relación de consumo en el uso del hardware que tiene 4789 toneladas de CO₂, se requieren 14.231 árboles, un número elevado al compararse con la cantidad de árboles requeridos por humano.

Alto consumo de agua: Los centros de datos (donde se almacena la información física), requieren de grandes cantidades de agua para su adecuado funcionamiento, lo cual, suma otro actor en la competencia del vital líquido, se estima que, una interacción sencilla dentro del marco de una sesión de consulta de 15 preguntas a la IA puede llegar a consumir hasta un litro de agua [8], [25], [26], [27], [29]; [30], a razón que los centros

de datos donde se procesa físicamente la información requieren grandes volúmenes de agua como sistema eficiente de refrigeración y a su vez, que la gran mayoría de estos lugares son alimentados por energía de hidroeléctricas.

Desaparición de ecosistemas y pérdida de biodiversidad: Sumados los factores anteriormente enunciados: Alto consumo de agua, excesivo consumo de energía y dependencia de hidroeléctricas, los ecosistemas serán transformados para aprovechar infraestructuras para el almacenamiento de agua, lo que lleva a la transformación, fragmentación y desaparición de ecosistemas y posteriormente a la extinción de las especies menos resilientes [21].

Para la puesta en marcha de los procesadores de información que requiere la IA, por su alta demanda energética, motiva a que se sigan generando proyectos de hidroeléctricas que colocan en riesgo muchos ecosistemas que son transformados por estas iniciativas. [26]; [30]; [31]; [32]; [33].

Impactos Ambientales Positivos

Pasando ahora a la reflexión y análisis de los impactos positivos (acciones que generen prevención, mitigación o corrección de problemas que son un riesgo a ecosistemas, seres vivos o actividades humanas [42], [20], [21], [22]); En ese sentido, se ha rastreado en este estudio que cerca de un 82 % de la literatura muestran que la IA brinda un gran apoyo a diversas áreas del pensamiento humano y que guardan estrecha relación con lo ambiental: Economía, Educación, Negocios, Agricultura, Producción Manufacturera, Turismo, [33]; [34], [35], [36].

En este análisis documental, los autores manifiestan que la IA constituye un gran apoyo para apalancar las habilidades humanas como la creatividad y la imaginación, ya que, la IA puede efectuar tareas operativas que suelen ser rutinarias y que pueden ahorrar mucho tiempo, lo cual, estaría facilitando la vida de los seres humanos [34], [35], y al promover un uso adecuado de tiempo para otras tareas, daría mayor tiempo para momentos destinados a promover la creatividad, imaginación y capacidad de inventiva, lo cual hace, que vista desde esa forma, la IA se consolide como un gran apoyo en la búsqueda de soluciones apoyadas en la Ingeniería o que pueden fortalecer nuevos procesos en los sectores productivos y de negocios, facilitando el emprendimiento o promoviendo cambios en los procesos o inspirando cambios en los productos o modelos de servicio que pueden resultar novedosos [35], [36].

Algunos autores citan que en la parte arquitectónica, la IA puede establecer sistema sostenibles, ya que, pueden colaborar en el diseño de planos, y el cálculo de materiales y estructuras que promuevan y gestionen el uso eficiente y adecuado para la recirculación y aprovechamiento de agua en una obra, instalación o edificio; así como, la incorporación de energía sostenible que mitigaría el impacto ambiental, o apoyando en el cálculo, diseño de estructuras sostenibles que faciliten un mejor aprovechamiento de los materiales y

las condiciones ambientales [35]; [36],, como vincular las corrientes naturales de aire para la disminución del uso de aire acondicionado, evitando la dependencia energética y que se base en soluciones prácticas y desde el conocimiento del ámbito natural que promueva el menor impacto posible [10]; [11]; [12].

Estos esfuerzos que se pueden lograr con un adecuado entrenamiento de la IA, pueden brindar elementos que apoyen el conocimiento de Ingeniería, Arquitectura e Infraestructura de lugares de trabajo, estudio o quizá hasta los hogares, pueden sumarse a las acciones desarrolladas por los seres humanos, tales como las estrategias comunitarias de educación ambiental para promover y regular el uso eficiente de los recursos, frenando los impactos negativos que se generan al entorno. De hecho, la IA, combinada con estrategias de Educación Ambiental, incluso, se pueden involucrar en la implementación de algunas alternativas como formular planos para el uso eficiente de aguas lluvia que permitan irrigar una estructura de muros, techos y terrazas verdes, como alternativa para evitar las islas de calor y la mala calidad de aire en lo que respecta a las ciudades [8]; [9], [10]; [11]; [12]; [13], o incluso, en la promoción de alternativas de agricultura urbana que propendan por mejorar la calidad de vida de las personas más vulnerables en las ciudades, por medio del suministro de alimentos.

En ese sentido, teniendo en cuenta dichas afectaciones, es claro que la IA, desde su creación ha ofrecido herramientas valiosas a los seres humanos para alcanzar algunos Objetivos de Desarrollo Sostenible: El ODS 2 (hambre cero) y el ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles) [2]. Sin embargo, también es importante mencionar que, de no tomarse las precauciones pertinentes, la implementación actual de la IA puede comprometer otros objetivos esenciales para la supervivencia de variadas y numerosas especies, como lo son: El ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) [2]. Por lo cual, es necesario que desde cada actor social se piense en una estrategia coherente que alinee el desarrollo tecnológico con los principios de sostenibilidad global, garantizando que la IA sea parte de la solución a los desafíos ambientales, no del problema.

Oportunidades, retos y acciones a nivel comunitario

Ahora bien, es importante en este apartado mencionar las posibilidades que tienen las comunidades frente a los impactos de la IA, ya que, es indudable que el uso de la IA en Colombia crecerá en los próximos años, ya que, como se abordó anteriormente en el territorio nacional como el CONPES 3975 del 2019 [43] y la Resolución 1117 de 2022 expedida por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en Colombia [44], que priorizan el uso de las IA y proporcionan los lineamientos para la transformación digital de ciudades y territorios en Colombia, a fin de involucrar mucho más la sociedad con la tecnología, en ese sentido, es necesario que cada persona ya asuma la responsabilidad para informarse sobre los impactos que genera a la naturaleza cada acción que se realiza.

Por consiguiente, cada individuo como un actor que pertenece a una comunidad, es importante que reflexione que, así como hay acciones que impactan de manera positiva o negativa el entorno, a su vez, es importante establecer actividades que mitiguen los impactos ambientales de la IA. Algunas van desde aspectos sencillos como el cuestionamiento, teniendo en cuenta el consumo responsable, y preguntar ¿realmente es necesario usar la IA para el desarrollo de esta actividad o tarea?, ¿Es clara la orden o comando para guiar la interacción con la IA?, ¿realmente es necesario generar la interacción con la IA o es totalmente irrelevante? [30], [37]. Estos cuestionamientos permiten un primer momento de introversión, necesario para comprender si se hará un uso responsable de la IA y realmente que tanta utilidad tendría para la actividad que se requiere encomendar, o bien, pensar en optimizar el tiempo de interacción, generando una adecuada arquitectura de la orden o comando que la IA podría llegar a ejecutar para gastar menor tiempo, lo que traduce a un ahorro de agua y energía, apuntando así a la eficiencia energética.

Una segunda acción que puede ayudar mucho, es divulgar a los demás miembros de la comunidad acerca de los impactos ambientales que se generan con el uso de la IA, para que se promueva la reflexión crítica y su uso responsable en la implementación de estas tecnologías, de manera que minimicen sus impactos ambientales [30], [37], y por supuesto, llevar esta conversación al ámbito cotidiano.

A su vez, estos hallazgos establecen la hipótesis de un desbalance entre la adopción acelerada de IA y la capacidad institucional para gestionar sus externalidades ambientales. La evidencia respalda la necesidad de que las entidades encargadas de la veeduría, seguimiento y control del adecuado uso de los recursos naturales para que se exijan reportes de sostenibilidad a las organizaciones que declaren el uso de la IA en sus procesos, para evidenciar cómo se compensan o mitigan los impactos anteriormente mencionados que acarrea su uso [30]; [31]; Aunado a esto, dichas entidades deben generar mecanismos que permitan identificar y rastrear los impactos socio-ambientales en territorios de extracción minera vinculados a la cadena de suministro de semiconductores y demás elementos que se relacionan con el entrenamiento y funcionamiento de las IA [47], [39].

En consecuencia, es importante que los tomadores de decisiones reflexionen sobre su rol político y su capacidad de gestión, y en este caso, se debe exigir desde todas las esferas al poder legislativo el desarrollo de la conversación sobre los impactos ambientales de la IA, donde se pueda promover mayores estudios en los impactos, la mitigación de impactos, uso eficiente de IA, y por supuesto, la innovación en el diseño eficiente de los centros de datos que conduzcan a la reducción de consumo de agua y energía de los mismos.

Por último, se hace necesario solicitar a los representantes del Gobierno y del sector productivo, que se agilice la inversión e implementación de proyectos en energías

renovables y como ciudadanos también se puede requerir, promover, desarrollar y por supuesto, participar en el desarrollo de políticas que regulen el impacto ambiental de la tecnología, supervisar su cumplimiento y propender también, por el responsable de la IA.

Algunas recomendaciones que surgen del estudio

El uso de la inteligencia artificial puede ahorrar el tiempo en la búsqueda de información, permitir elaboración de documentos con prontitud, pero, se ha demostrado que también, limita los procesos de concentración, se debe considerar como herramienta, pero, no debe soportar todas las tareas. El estudio de Bloomfield, et al [38] revela que, para tener aspectos favorables en los procesos de software ecológico se deben considerar estos cinco factores clave, a saber, "preparación ecológica", "infraestructura", "métodos", "herramientas" y "tendencias emergentes", que exhiben un impacto notable para reducir los impactos de consumo asociados a las IA.

Por consiguiente, para reducir las emisiones asociadas con las operaciones de tecnologías de información (TI), es importante también, que se pueda pensar la forma más eficiente en la que se debe hacer la transición a Tecnología de la Información Verdes (TIV) [40], contribuyendo así al logro de sistemas de economía ecológica, donde los desarrolladores, previamente, deben tener análisis de los procesos comerciales, análisis de ciclo de vida del producto, la gestión de la cadena de suministro, y se contemplen los impactos ocasionados por los desechos y el consumo de agua, donde se pueda promover la eficiencia energética, con el ánimo de mitigar algunos de los impactos ocasionados en los procesos de generación del producto o servicio.

Ahorabien, aun cuando la literatura especializada reconoce tanto los beneficios funcionales de la IA, como sus externalidades ambientales, esta revisión evidencia que persiste un vacío empírico en la cuantificación sistemática de su huella ecológica durante todo el ciclo de vida tecnológico—desde la extracción de minerales críticos para su producción y desarrollo hasta la disposición final del hardware obsoleto. En ese sentido, en América Latina, y particularmente en Colombia, la evidencia es fragmentada y se concentra en reportes sectoriales sin integración interinstitucional; por ello, resulta una tarea ardua y con cierto nivel de dificultad evaluar la coherencia de la rápida digitalización con las metas climáticas nacionales (Ley 2169/2021) [47] y los Compromisos Determinados a Nivel Nacional (NDC) ante el Acuerdo de París [45], [46].

Partiendo de lo anteriormente expuesto, los investigadores señalan que futuras investigaciones deberían: (i) incorporar mediciones in-situ de consumo energético en centros de datos latinoamericanos [51], [52], (ii) aplicar métodos de contabilidad ambiental ampliada (EIO-LCA) [53], [54], y (iii) evaluar impactos distributivos sobre comunidades aledañas a proyectos hidroeléctricos que alimentan infraestructuras de IA [55], [56], (iv) investigar sobre campos emergentes, como es el impacto que el desarrollo y la implementación de tecnologías de IA tiene en la atención sanitaria, en dónde se

analice las repercusiones que la IA tiene para la salud humana y de los demás seres vivos [39].

Conclusiones

Esta revisión bibliométrica y documental de los últimos 30 años (1994-2024) confirma la dualidad ambiental de la IA: De los 491 documentos analizados, el 65 % relaciona la IA con un elevado consumo energético y el 48 % con un uso hídrico significativo, impactos catalogados como negativos y que se oponen a los ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y 7 (Energía asequible y no contaminante). En contraste, el 82 % de la literatura muestra como impactos positivos a aquellas aplicaciones que optimizan recursos y apoyan los ODS 2 (Hambre cero) y 11 (Ciudades y comunidades sostenibles).

El balance global confirma que, sin mejoras en eficiencia energética, la expansión de la IA incrementará dramáticamente sus impactos ambientales negativos. Para que su adopción contribuya al desarrollo sostenible, es prioritario implementar infraestructuras de baja intensidad energética e hídrica. A su vez, se debe pensar en estandarizar y aplicar métricas que cuantifiquen las huellas de carbono y agua en el contexto colombiano, lo que amplía la información necesaria que los tomadores de decisiones requieren al momento de formular políticas públicas de aspecto tecnológico.

Referencias

- [1] S. Falk y A. van Wynsberghe, "Challenging AI for Sustainability: what ought it mean?" *AI Ethics*. 2023. <https://link.springer.com/article/10.1007/s43681-023-00323-3>
- [2] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), *OECD Reviews of School Resources: Colombia 2018*, París, 2018. https://www.oecd.org/en/publications/oecd-reviews-of-school-resources-colombia-2018_9789264303751-en.html
- [3] A. Portocarrero-Ramos, "El costo ambiental de la Inteligencia Artificial," Trabajo de grado de Pregrado, Universidad de Anáhuac, México, 2024. <https://www.anahuac.mx/mexico/publicaciones>
- [4] L. Gómez, L. Muriel y D. Londoño-Vásquez, "El papel del docente para el logro de un aprendizaje significativo apoyado en las TIC", *Encuentros*, vol.17. Núm. 2. pp. 118-131. 2019. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476661510011>
- [5] G.A. Hernández Almanza, "Metodología TIC en la enseñanza de educación ambiental para el desarrollo sostenible", *Educación y Ciudad*, núm. 40, págs. 129-146, 2020. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.36737/01230425.n40.2021.2461>
- [6] FJ Santos-Caamaño, MJ Vázquez-Cancelo y ER Rodríguez-Machado, "Tecnologías

- digitales y ecologías de aprendizaje: desafíos y oportunidades", *Educatio Siglo XXI*, [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.6018//educar.466>
- [7] M. R. Flórez Leal, J. A. Támara Uribe, J. A. Cárdenas, y F. M. Almanza Caro, «La inteligencia artificial, los retos y oportunidades en la gestión del conocimiento», *Mundo Fesc*, vol. 13, n.º S1, pp. 46–67, dic. 2023. <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/1425>
- [8] C. Ponce de León, C, et al., "Interacciones entre naturaleza y sociedad al presente y futuro: caminos hacia el desarrollo sostenible y el buen vivir", en *Evaluación Rápida de la Diversidad Biológica y Servicios Ecosistémicos en la Región Amazónica*, ME Corvalán, Ed., Brasilia, Brasil: OTCA, Proyecto OTCA/BIOMAZ, GIZ-Brasil, Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ), Instituto Humboldt (Colombia), 2023. [En línea]. Disponible: <https://agris.fao.org/search/en/providers/124901/records/67122da37f591113e2a4dd66>
- [9] A.P. Araméndiz-Méndez, *Modelación Dinámica de la Gestión Ambiental entre 2004-2012, su aporte para la construcción de Capital Humano en la localidad de Engativá*, [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/11349/3737>
- [10] Contraloría de Cundinamarca, *Informe del estado de los recursos naturales y del ambiente del departamento de Cundinamarca*, 2018. [En línea]. Disponible: <http://www.contraloriadecundinamarca.gov.co/index.php/es/2014-12-10-21-50-00/procesoauditor/2014-12-15-16-39-01>
- [11] Departamento Nacional Estadístico de Colombia (DANE), *Resultados de la información técnica del Censo Nacional de Población y Vivienda*. 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-2018/informacion-tecnica>
- [12] Departamento Nacional de Planeación, *Informe sobre rellenos sanitarios*, Departamento Nacional de Planeación. 2018. [En línea]. Disponible: <https://2022.dnp.gov.co/Paginas/Rellenos-sanitarios-de-321-municipios-colapsar%C3%A1n-en-cinco-a%C3%B1os,-advier-te-el-DNP-.aspx>
- [13] D. Cossul, G. Ferreira, M. Mueller, R. Mirandoli and R. Frozza, "Artificial intelligence in knowledge management: application insights and guidelines", *Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review)*, vol. 14, no. 8, pp. 13320-13335, 2023. <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/2605>
- [14] R.C. Guacán. R.E. Miguez. R.F. Lozada. D.I. Jácome. W.A. Cruz. "La Inteligencia Artificial utilizada como un recurso para el aprendizaje", *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. vol 7, no 4. Pp. 8263-8277. 2023. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7561

- [15] D. A. Duarte Arias y O. Ortega Chacón, «Inteligencia artificial: retos y desafíos de la ética laboral en la sociedad tecnológica», *Mundo Fesc*, vol. 12, n.º S3, pp. 266–280, dic. 2022. <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/1458>
- [16] D.F. Arbeláez-Campillo. J.J. Villasmil. M.J. Rojas-Bahamón. «Inteligencia artificial y condición humana: ¿Entidades contrapuestas o fuerzas complementarias?» *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, vol. 27, no 2. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28066593034>
- [17] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Educación Nacional. *Política Nacional de Educación Ambiental SINA*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Ministerio de Educación Nacional. 2003. [En línea]. Disponible en: <https://observatoriomesoamerica.minambiente.gov.co/obsmesoamerica/medios/Colombia/POLITICA%20EDUCACION%20AMBIENTAL.pdf>
- [18] A. Ángel-Maya. «La Fragilidad ambiental de la cultura. Historia y medio ambiente. Segunda edición». 1995. [En línea]. Disponible en: https://augustoangelmaya.org/statics/images/obra/fragilidad_ambiental_de_la_cultura.pdf
- [19] J. Carrizosa-Umaña. «¿Qué es el ambientalismo? La visión ambiental compleja». 2000. [En línea]. Disponible en: https://enriquedussel.com/txt/Textos_200_Obras/Filosofia_ambiental/Que_es_ambientalismo-Julio_Carrizosa.pdf
- [20] I.D. Coria. «El estudio de impacto ambiental: características y metodologías» *Invenio*, vol. 11, no. 20. 2008. pp. 125-135. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/877/87702010.pdf>
- [21] Ministerio De Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Listado de Impactos Ambientales específicos*, 2021. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/Listado-de-Impactos-Ambientales-Especificos-2021-V.4.pdf>
- [22] Universidad del Valle. ¿Sabes qué son aspecto e impacto ambiental? 2024. [En línea]. Disponible en: <https://serviciosvarios.univalle.edu.co/8-noticias/44-sabes-que-son-aspecto-e-impacto-ambiental>
- [23] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista, *Metodología de la investigación*, 5ª ed., México DF: McGraw-Hill, 2010.
- [24] Scopus, Base de datos de Scopus, [En línea]. Disponible: <https://www.scopus.com/> (Acceso: Junio 2024).

- [25] Web of Science, Base de datos de Web of Science, [En línea]. Disponible: <https://webofscience.help.clarivate.com/es-es/Content/registration-signin.html> (Acceso: Junio 2024).
- [26] E. Strubell, A. Ganesh, y A. McCallum, "Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP," Working Paper, College of Information and Computer Sciences - University of Massachusetts Amherst, Boston, EE. UU., 2019. https://www.researchgate.net/publication/342722474_Black_boxes_not_green_Mythologizing_artificial_intelligence_and_omitting_the_environment
- [27] E. Strubell, A. Ganesh, y A. McCallum, «Energy and Policy Considerations for Modern Deep Learning Research», Proc. AAAI Conf. Artif. Intell., vol. 34, n.o 09, pp. 13693-13696, abr. 2020, <https://doi.org/10.1609/aaai.v34i09.7123>
- [28] World Bank. Supporting Transition in Coal Regions: A Compendium of the World Bank's Experience and Guidance for Preparing and Managing Future Transitions. 2021. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10986/35323>
- [29] Green Peace. ¿Por qué nos tiene que importar muchísimo el cambio climático y qué hay que hacer para que no avance?. 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.greenpeace.org/colombia/blog/issues/climayenergia/por-que-nos-tiene-que-importar-muchisimo-el-cambio-climatico-y-que-hay-que-hacer-para-que-no-avance/>
- [30] A. Mollen y K. Vieth-Ditlmann, "Just Measure It: The Environmental Impact of AI," Sustain AI Magazine, vol. 3, 2023. <https://sustain.algorithmwatch.org/en/just-measure-it/>
- [31] J. S. Bergstra, R. Bardenet, y Y. Bengio, y B. Kégl, "Algorithms for hyper-parameter optimization," Advances in Neural Information Processing Systems, pp. 2546-2554, 2011. https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2011/hash/86e8f7ab32cfd12577bc2619bc635690-Abstract.html
- [32] J. Bergstra y Y. Bengio, "Random search for hyper-parameter optimization," Journal of Machine Learning Research, vol. 13, pp. 281-305, feb. 2012. <https://www.jmlr.org/papers/volume13/bergstra12a/bergstra12a.pdf>
- [33] F. J. Santos-Caamaño, M. J. Vázquez-Cancelo, y E. R. Rodríguez-Machado, "Tecnologías digitales y ecologías de aprendizaje: desafíos y oportunidades," Educatio Siglo XXI, vol. 39, núm. 2, pp. 19-40. 2021. [En línea]. Disponible: doi: <https://doi.org/10.6018/educatio.466091>
- [34] L. Gómez, L. Muriel, y D. Londoño-Vásquez, "El papel del docente para el logro de un aprendizaje significativo apoyado en las TIC," Encuentros, vol. 17, núm. 02, pp.

118-131, Universidad Autónoma del Caribe, 2019. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476661510011>

- [35] G. A. Hernández Almanza, "Metodología TIC en la enseñanza de educación ambiental para el desarrollo sostenible," *Educación y Ciudad*, núm. 40, pp. 129-146, 2020. doi:10.36737/01230425.n40.2021.2461.
- [36] G. D. Cortés-Dussán, A. P. Araméndiz-Méndez, y H. R. Cantor-Marentes, "Aprendizaje autodirigido: Enseñanza de la avifauna en una Institución Rural (La Calera), *Educación y ciudad*, núm. 45, p. e2852, jul. 2023, <https://doi.org/10.36737/01230425.n45.2023.2852>
- [37] M. González, H. Ordoñez, y J. S. González-Sanabria, "¿Tienen Derechos los Algoritmos?," *Praxis & Saber*, vol. 15, núm. 43, pp. 1-21, 2024, doi: <https://doi.org/10.19053/22160159.v15.n43.2024.16779>
- [38] C. Valmohammadi y F. Mortaz Hejri, «Designing a conceptual green process model in software development: A mixed method approach», *Int. J. Inf. Manag. Data Insights*, vol. 3, n.o 2, p. 100204, nov. 2023, doi: 10.1016/j.jjime.2023.100204.
- [39] P. Bloomfield, P. Clutton-Brock, E. Pencheon, J. Magnusson, y K. Karpathakis, «Artificial Intelligence in the NHS: Climate and Emissions», *J. Clim. Change Health*, vol. 4, p. 100056, oct. 2021, doi: 10.1016/j.joclim.2021.100056.
- [40] A. Molla, V. Cooper, y S. Pittayachawan, «The Green IT Readiness (G-Readiness) of Organizations: An Exploratory Analysis of a Construct and Instrument», *Commun. Assoc. Inf. Syst.*, vol. 29, 2011, doi: 10.17705/1CAIS.02904.
- [41] Banco Interamericano de Desarrollo. El Estado de la Educación en América Latina y el Caribe 2023. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/El-estado-de-la-educacion-en-America-Latina-y-el-Caribe-2023.pdf>
- [42] Ministerio De Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 1076 de 2015. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- [43] Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Departamento Administrativo de la Presidencia de la República. CONPES 3975 de 2019. [En línea]. Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3975.pdf>
- [44] Ministerio De Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Resolución 1117 de 5 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://mintic.gov.co/portal/715/>

articles-208739_recurso_1.pdf

- [45] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Colombia: Actualización 2020, Bogotá, Colombia, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/05/NDC_Libro_final_digital-1.pdf
- [46] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), "El Acuerdo de París," UNFCCC, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- [47] Congreso de la República de Colombia, Ley 2169 de 2021: Por medio de la cual se establecen lineamientos para alcanzar la neutralidad de carbono y resiliencia climática a 2050, Bogotá, Colombia, dic. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/ley-2169-de-2021/>
- [48] J. Sadowski, *Too Smart: How Digital Capitalism is Extracting Data and Disrupting Lives*, Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2020.
- [49] D. Patterson et al., "Carbon Emissions and Large Neural Network Training," in Proc. 2022 ACM/IEEE Int. Symp. on Low Power Electronics and Design (ISLPED), Boston, MA, USA, 2022, pp. 1–6. DOI: 10.1145/3531437.3539453.
- [50] Congreso de la República de Colombia, Ley 2169 de 2021: Por medio de la cual se establecen lineamientos para alcanzar la neutralidad de carbono y resiliencia climática a 2050, Bogotá, Colombia, dic. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/ley-2169-de-2021/>
- [51] F. Morales-Hernández, R. Fernández-Berni, and F. Cazorla, "Towards Sustainable Data Centers in Latin America: Challenges and Measurement Techniques," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 48021–48035, May 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3272025.
- [52] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), *La Infraestructura Digital en América Latina: Estado Actual y Desafíos Futuros*, Santiago de Chile, Chile, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/48166>
- [53] C. J. Hendrickson, L. B. Lave, and H. S. Matthews, *Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach*, Washington, DC, USA: Resources for the Future Press, 2020.
- [54] M. Ochoa, A. Alvarado, and D. García, "Aplicación del análisis de ciclo de vida económico-ambiental (EIO-LCA) a la producción de electricidad en Colombia," *Revista EIA*, no. 36, pp. 137–151, Dec. 2021. DOI: 10.24050/reia.v18i36.1571.

- [55] A. E. Duarte-Abadía and M. Boelens, "Disputes over Territorial Boundaries and Diverging Valuation Languages: The Santurbán Hydropower Project in Colombia," *Water International*, vol. 46, no. 2, pp. 187–205, Mar. 2021. DOI: 10.1080/02508060.2021.1888866.
- [56] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), *Estudio Nacional del Agua 2022: Evaluación de la oferta hídrica y los usos sectoriales*, Bogotá, Colombia, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ideam.gov.co/estudio-nacional-del-agua>