

Environmental impact of the growing use of AI

Laura Bazán, Dr. ¹; Patricia Uceda, Dr. ¹

¹ Universidad Privada del Norte, Perú, laura.bazan@upn.pe, patricia.ucedata@upn.edu.pe

Abstract— The evolution of the use of AI is signaling a before and after in the inclusion of technologies, and it is still difficult to predict the immediate future, as it has become an essential instrument for scientific challenges; it is noted that it is necessary to create sustainable technological solutions with environmentally friendly indicators, since AI has been generating an impact in the environmental sphere. The objective of this research was to describe the environmental impact of the growing use of AI, considering the different effects on natural resources and determining some preventive or corrective actions to minimize the impact of this discipline. An exploratory approach of the descriptive level was considered, with a non-experimental design. It was concluded that energy consumption, water footprint, electronic waste and the use of minerals are the main impact factors. The research reveals that the AI industry is heading towards an energy crisis, with an exponential increase in electricity demand that could outstrip supply capacity in the coming years. It is important to raise awareness in society about the environmental impact of AI and promote education on sustainable practices in the use of this technology.

Keywords— Environmental impact, AI, Energy consumption, water footprint, electronic waste.

Impacto ambiental del uso creciente de la IA

Laura Bazán, Dr. ¹; Patricia Uceda, Dr. ¹

¹ Universidad Privada del Norte, Perú, laura.bazan@upn.pe, patricia.ucea@upn.edu.pe

Resumen— *La evolución del uso de la IA está señalizando un antes y un después en la inclusión de tecnologías, siendo aún difícil predecir el futuro inmediato, ya que se ha convertido en un instrumento esencial para los desafíos científicos; se advierte que se requiere crear soluciones tecnológicas sostenibles y con indicadores respetuosos con el medio ambiente, ya que la IA viene generando impacto en la esfera medioambiental. El objetivo de la presente investigación fue describir el impacto ambiental por el uso creciente de la IA, teniendo en cuenta los diferentes efectos en los recursos naturales y determinando algunas acciones preventivas o correctivas para minimizar el impacto de esta disciplina. Se tuvo en cuenta un enfoque exploratorio del nivel descriptivo, con un diseño no experimental. Se concluyó que el consumo energético, la huella hídrica, los residuos electrónicos y el uso de minerales son los principales factores de impacto. La investigación revela que la industria de la IA se dirige hacia una crisis energética, con un aumento exponencial en la demanda de electricidad que podría superar la capacidad de suministro en los próximos años. Es importante sensibilizar a la sociedad sobre el impacto ambiental de la IA y promover la educación sobre prácticas sostenibles en el uso de esta tecnología.*

Palabras Clave— *Impacto ambiental, IA, Consumo energético, Huella hídrica, Residuos electrónicos.*

I. INTRODUCCIÓN

La inteligencia artificial (IA) ha sido desde sus inicios definida por Turing como la disciplina que tiene como fin el construir máquinas con la inteligencia y la capacidad de realizar tareas de desempeño humano [1]; es la habilidad que tienen los ordenadores para realizar actividades que normalmente requieren inteligencia humana [2]. La IA se ha ido desarrollando a casi todas las áreas del conocimiento, destacando en sus aplicaciones el tema de salud, educación, economía, industria, entre otras.

En la salud, la aplicación de la IA ha demostrado ser un complemento clínico con resultados notables; no ha sido fácil el incorporar tecnología disruptiva en medicina por principios que velan el acto médico, siendo complejo el contradecir el paradigma fundamental de la percepción clínica; el uso de algoritmos que diagnostican con imágenes de mayor precisión que el sentido humano, ha significado un asistente importante con técnica computacional de procesamiento de datos al obtener información para prevenir y detectar de manera oportuna, incluso con un diagnóstico más efectivo, y con intervenciones, tratamientos y el seguimiento del paciente [3].

A lo largo de los últimos años se vienen presentando la creación de dispositivos y algoritmos que reemplazan a los seres humanos y vienen desarrollando algunas funciones cognitivas; por ejemplo, Santa Bárbara Smart Health ha venido

aplicando la inteligencia artificial a través de machine learning para reconocer patrones vinculados con el campo médico y; Nous Intelligence aplicó tecnología Deep learning para imitar el cerebro humano, generando independencia para aprender de manera independiente. Ambas experiencias vinculadas con el campo médico [4].

En el ámbito educativo, el uso de la IA ha abarcado las dimensiones de gestión educativa, el proceso de enseñanza-aprendizaje (desde la perspectiva del estudiante y del docente) y la evaluación, generando nuevos retos de formación y actualización que requieren la ampliación y formación de conocimientos, competencias y habilidades que den el suficiente soporte [5].

En el ámbito financiero, la IA ha mostrado su efecto a nivel político, social y económico, que incluye cambios en la industria, plataformas y los modelos de negocio, en un escenario donde se fomenta cada vez más la IA a través de efectividad de estrategias con dinámicas políticas y económicas [6].

Debido a la creciente presencia de la IA, muchos países comenzaron a desarrollar políticas públicas con la finalidad de incluir estrategias de IA en el sector público, en particular. Por ejemplo, en el SumMIT 2020, diversos actores se reunieron para abordar retos vinculados con: gobernanza de la inteligencia artificial, recursos humanos y educación, infraestructura, sector privado, regulación ética y derechos humanos y ecosistema de datos. En este acuerdo se resaltaron políticas y modelos de gobernanza multiactor de Chile, Brasil y Colombia, que fueron elaborados por sus ministerios de Ciencia y Tecnología [4].

Como parte de estas iniciativas, ya las instituciones de gobierno e innovación de diferentes países han venido evaluando la necesidad de crear: nuevas infraestructuras y aumento de velocidad de megabits por segundo (Red 5G vinculada a la IA) o el desarrollo de la computación neuro mórfica (con nuevo recurso hardware que soporte nuevos algoritmos vinculados con IA con mayor eficiencia) o las nuevas infraestructuras distribuidas de tipo hiper escala (nube) [4]; pero aún no se visualiza el impacto ambiental de todo este nuevo crecimiento en recursos.

La evolución del uso de la IA está señalizando un antes y un después en la inclusión de tecnologías, siendo aún difícil predecir el futuro inmediato, ya que se ha convertido en un instrumento esencial para los desafíos científicos. En los últimos años ha significado un gran avance en muchas áreas,

sobretudo en la biología y medicina, advirtiendo además la eclosión del libre acceso [7].

Iturmendi [8], enuncia que, si bien es cierto que la IA viene ofreciendo diferentes beneficios, también advierte que se requiere crear soluciones tecnológicas sostenibles y con indicadores respetuosos con el medio ambiente, ya que la IA viene generando impacto en la esfera medioambiental por una huella de carbono significativa que se debe al alto consumo energético en los centros de datos y el entrenamiento de algoritmos complejos.

Abordando el uso de la IA y su impacto ambiental, Araiz [9] en España señala que se está afectando el medio ambiente por la enorme cantidad de energía utilizada por los modelos de IA donde las TIC constituyen del 5 al 9% del consumo de electricidad en el mundo, pudiendo llegar a 20% en el 2030; en emisión de CO₂ se alcanza un 1.4% a nivel mundial; entre otros tipos de efectos se encuentra la IA por el medio en que operan y otro considerado al desarrollo y funcionamiento, en donde se concibe claramente el consumo de energía eléctrica para entrenamiento de algoritmo.

Es muy visto que existen muchas innovaciones vinculadas por la IA e iniciativas climáticas, como: uso de la IA para reducir emisiones de carbono donde se puede modelar el consumo de energía y huella de carbono, establecimiento de un sistema de alerta temprana que combina IoT e IA para monitorear situaciones para una reacción rápida, gestión de la vulnerabilidad y riesgo gracias al análisis de patrones de imágenes 3D, análisis histórico de datos que ayuden a reconocer a tiempo el cambio climático, entre otros [10].

El objetivo de la presente investigación fue describir el impacto ambiental por el uso creciente de la IA, teniendo en cuenta los diferentes efectos en los recursos naturales y determinando algunas acciones preventivas o correctivas para minimizar el impacto de esta disciplina.

II. MÉTODO

Se tuvo en cuenta un enfoque exploratorio del nivel descriptivo, con un diseño no experimental, buscando describir las características sin manipulación de variables. Para el desarrollo, se realizó un análisis documental de datos cuantitativos y cualitativos, a través de la búsqueda en bases de datos académicas para identificar estudios relacionados con el impacto ambiental de la IA. Se buscó datos sobre huella de carbono y consumo energético de la infraestructura concerniente (centro de datos, modelos de machine learning, etc.) teniendo en cuenta estudios y fuentes formales.

Se desarrollaron en tres fases, I. Identificación de literatura científica relevante, II. Categorización y

organización de la información recopilada y III. Interpretación de los resultados para la discusión de hallazgos y la elaboración de conclusiones sobre la atenuación del impacto ambiental de la IA.

Se consideraron indicadores de impacto ambiental como: (a) Consumo eléctrico (kWh), (b) Huella de carbono (kg de CO₂ equivalente) y (c) Eficiencia energética de los modelos de IA. Lo indicado permitió obtener una visión general sobre el impacto ambiental de la IA que proporcione avances para futuras investigaciones, así como acciones de mitigación [11].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ciclo de vida de la inteligencia artificial involucra dos aspectos principales: software y hardware y es en base a estos dos aspectos que debe evaluarse la huella ambiental de la inteligencia artificial. Respecto al ciclo de vida del software, se evalúa la recopilación y preparación de datos, construcción de modelos, entrenamiento, validación, implementación, consecuencia, mantenimiento y baja. Mientras que, el ciclo de vida del hardware involucra la producción de chips de computadora, unidades de procesamiento gráfico (GPU) esenciales para el entrenamiento y la inferencia, y la construcción y operación de centros de datos. El proceso involucra: extracción de materia prima, fabricación y envío, la construcción del centro de datos y concluye con la operación, mantenimiento y eliminación de residuos electrónicos [12].

El uso de sistemas IA hace referencia al proceso de un modelo que capta entradas de datos (inputs) para luego convertirlos en información a través de la comparación con datos entrenados y con previo procesamiento, llegando a decisiones expresadas como predicciones o resultados (outputs). Todo este procedimiento de conversión y comparación de información requiere una cantidad inmensa de energía [9].

La necesidad de brindar mejores servicios generó el escalamiento exponencial de la IA con importantes implicaciones energéticas, huella ambiental y crecimiento de huella de carbono. Por ejemplo, el modelo ML de Meena [13] equivale a 242 231 millas de trayectoria de vehículo de pasajeros promedio [14]; este es sólo uno aspecto, debemos considerar el ecosistema de IA de manera integral en el futuro.

Se informó que la industria de la inteligencia artificial va hacia una crisis energética, incluso, se menciona tecnología como fusión nuclear, la cual no necesariamente logrará descarbonizar la crisis climática [15].

Estableciendo una clasificación de impacto negativo que genera el uso de la IA en sus diferentes aplicaciones, se ha organizado los resultados en las siguientes categorías: (a) El

Consumo energético, (b) La huella hídrica, (c) Los residuos electrónicos y (d) El uso de minerales y materiales.

El consumo energético

El consumo energético está relacionado a los centros de datos de entrenamiento y ejecución de modelos de IA, puesto que se requiere gran cantidad energética aumentando la emisión de CO₂; OpenAI al desarrollar modelos como ChatGPT, requiere gran cantidad de energía para el entrenamiento e inferencia, en este aspecto, los centros de datos aumentan el consumo de electricidad de manera creciente [16]. En menos de diez años, la cantidad de centros de datos en el mundo se ha duplicado [17], la IA ha sido uno de los detonadores para su incremento, pasando de 500.000 en el año 2012 a más de 8 millones y, por ende, el consumo de energía que abastece a estos centros se ha duplicado cada cuatro años [18].

Un estudio de expertos indica que para el 2027, la IA representaría el 0,5% del consumo de electricidad a nivel mundial, casi lo que Argentina utiliza en un año; se indica también que el consumo de electricidad en EE. UU. aumentaría en 20% en el 2030 debido a la IA. El problema es que no se tiene la suficiente energía para cubrir lo previsto por los centros de datos en los próximos 5-10 años, que significa un uso masivo de recurso adicional [19].

La industria de tecnologías de información y comunicaciones es responsable del 2.5% al 3% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y se proyecta que para el año 2040 pueda llegar a un 14% [11].

Respecto al consumo mundial de electricidad, el rango entre 6% y 12% es utilizado por la producción y uso de tecnología, centros de datos, redes y comunicaciones y son los países en desarrollo los que vienen asumiendo la mayor proporción de costos ambientales y son quienes vienen recibiendo menores beneficios [20].

La huella hídrica

Referida al uso intensivo del agua, ya que los centros de datos la utilizan para su refrigeración y enfriamiento (servidores y unidades de procesamiento gráfico), intensificando el estrés hídrico en regiones con escasez de agua. La IA ya es parte integral de la vida moderna, pero se ignora la huella hídrica, afectando el consumo más rápido de lo que se podría reponer; en España, se midió la huella hídrica operativa (cantidad de agua utilizada durante el entrenamiento y funcionamiento de modelos) obteniendo entre 700 000 y 4,9 millones de litros de agua. En cada conversación del modelo GPT-3, con 35 preguntas y respuestas simples, se consumió casi medio litro de agua limpia y la potencia energética utilizada se multiplica por dos cada 3,4 meses [21].

Respecto al consumo de agua, para poder culminar con el entrenamiento de un modelo, su clúster utilizó casi el 6% del agua del distrito. Del mismo modo, Google y Microsoft utilizaron cantidades superiores a las tradicionales para entrenar sus modelos Bard y Bing, que significó un crecimiento en 20% y 34% del consumo normal por año [15].

Los residuos electrónicos

Países del Sur Global suministran minerales y materiales que son necesarios para construir las infraestructuras físicas que vienen haciendo posible el desarrollo y crecimiento de IA, como los centros de datos, las unidades de procesamiento gráfico, los transistores, las baterías de litio, entre otros; pero, considera que el desarrollo de la inteligencia artificial perjudica el medio de la mayoría y beneficia a una porción minoritaria [22]. Estudios del Programa para el Medio Ambiente de la ONU identificaron a la inteligencia artificial como un riesgo para el medio ambiente, ya que, las soluciones de IA a gran escala integran centros de datos físicos y servicios en nube, los cuales tienen un costo alto para el planeta. Por ejemplo, para fabricar una computadora de 2 Kg se requiere aproximadamente de 800 Kg de materia prima y los microchips que utilizan estos equipos necesitan de tierras raras (REE) que se obtienen por procesos de extracción destructivo, que contamina el medio ambiente. Además, estos centros de datos producen residuos eléctricos y electrónicos que generalmente contienen mercurio y plomo, sustancias contaminantes [23].

Como mencionan los estudios, la IA continuará creciendo y con ello se generarán mayores volúmenes de desechos electrónicos, los cuales también vienen en ascenso, pero aún no se cuentan con cifras exactas de los desechos generados por los centros de datos o por los chips de la IA. Según la ONU a través del Monitor Mundial de Desechos Electrónicos (GEM), estos aumentan cinco veces más rápido que el reciclaje documentado. La generación anual de residuos electrónicos está aumentando en 2.6 millones de toneladas al año y se espera alcanzar los 82 millones de toneladas al 2030 [24].

El uso de minerales y materiales

Una búsqueda en internet con IA generó el consumo de órdenes de mayor tamaño, lo que se tradujo en un incremento del gasto energético en comparación con una búsqueda tradicional en Google. Este aumento estuvo vinculado, a su vez, con el crecimiento de casi el 50% de nuevos centros de datos, lo que impulsó la fabricación de chips. Como consecuencia, se incrementó la huella de carbono y el consumo de minerales necesarios para la producción de dichos chips [25].

Debido al auge de la IA, para el 2027, se prevé que la demanda de agua para fabricar chips y refrigerar un centro de

datos representará la mitad de lo que requiere el Reino Unido para su consumo natural. Además, la huella de carbono de los sistemas se está convirtiendo en un factor dominante para el entorno ambiental general de la IA [25].

Debido al avance tecnológico, los tipos de minerales que se requerían para fabricar chips se ha incrementado de 11 a más de 60, incluyendo Galio y Germanio, que no cuentan con normas federales de calidad en Estados Unidos y otros países, ya que se tiene poco conocimiento sobre sus efectos sanitarios y ecológicos, y que podría significar un gran riesgo para los gobiernos [26].

Los productos químicos más demandados para la producción frontend de semiconductores, son: (a) Materia prima: Silicio, Arseniuro de Galio, Nitrato de Galio, Carburo de Silicio, (b) Oxidación y recubrimiento: Dióxido de Silicio, Nitrato de Silicio, etc. (c) Litografía: cuarzo, Óxido de Silicio, Nitrato de Silicio, etc. (d) Desarrollo: Hidróxido de Sodio, Ácido Acético, etc. [20].

Si bien, a la fecha no se cuentan con cifras exactas sobre la demanda de minerales del sector de la IA, se espera que para el 2030 las cifras de minerales esenciales para la transición energética como el cobre, el litio, el níquel, el cobalto y las tierras raras se tripliquen [27]. Y, este crecimiento, genera contaminación en el agua y el aire, degradando la biodiversidad e incrementando las emisiones de gases de efecto invernadero [20]. Debido a que, el 52% de las minas de cobre están ubicadas en zonas de alto estrés hídrico, las tasas de reciclaje de los minerales siguen siendo bastante bajas, 45.5% para el cobre, 32.8% para el zinc, 32% para el cobalto, 0.5% para el litio y 0.2% para REE [28].

Los centros de datos incluyen diversa tecnología que incluyen chips y debido al auge de la inteligencia artificial, la demanda de estos recursos se incrementó. Por ejemplo, la cantidad de chips vendidos se cuadruplicó entre los años 2001 y 2022, y se evidencia constante crecimiento [20].

Atenuación del impacto ambiental de la IA

Parte de la solución, radica en establecer acciones vinculadas con evaluar la eficiencia energética de los data centers y para poder conocer estos indicadores de eficiencia, se pueden utilizar métricas como: (a) Power Usage Effectiveness (PUE), que establece la relación entre la cantidad de energía que ingresa a un centro de datos y la utiliza para que su infraestructura de TI funcione; si el valor es cercano a 1 significa que una operación es altamente eficiente. (b) Carbon Usage Effectiveness (CUE), evalúa la cantidad de emisiones de CO₂ generadas por unidad de energía consumida. Este indicador se centra en la huella de carbono que genera la operación de los centros de datos. (c) Water Usage Effectiveness (WUE), vinculado con la gestión del consumo de agua que se utiliza para enfriar el centro de datos. Este

indicador tiene tres categorías según cómo se reutilice o no el agua en este proceso: básica o WUE1, intermedia o WUE2 y avanzada o WUE3. (d) Factor de energía renovable (REF), se obtiene al dividir el consumo de energía renovable entre el consumo total de energía del Data Center. El valor ideal es aquel valor más cercano posible a 1 [29].

Dada la necesidad, ya existen iniciativas como el Pacto de EUDCA y CISPE que promueven la autorregulación que busca que los centros de datos sean climáticamente neutrales para el 2030. Al año 2023 ya se contaba con 88 operadores y 28 asociaciones comerciales de empresas de TIC. La European Data Centre Association (EUDCA) estimó que la demanda de electricidad de los centros de datos se cubrirá con un 75% de energía renovable o energía libre de carbono cada hora antes del 31 de diciembre de 2025, y con un 100% antes del 31 de diciembre de 2030, situación alentadora [30].

Pero, frente a estas iniciativas, sólo el 40 por ciento de los proveedores de centros de datos rastrean la utilización del servidor y poco más de un tercio mide sus emisiones de carbono, por lo que existe aún, trabajo por realizar [31].

La ausencia de una legislación que regule el impacto ambiental de la IA es una realidad en muchos países, incluyendo el Perú. Esta falta de regulación exige que las autoridades tomen medidas urgentes para establecer normas claras y promover acciones preventivas que protejan el medio ambiente. Por ello, Es fundamental difundir investigaciones y acuerdos relevantes, como la Declaración de Montreal para un desarrollo responsable de la IA, cuyo décimo principio aboga por un desarrollo y uso de la IA que garanticen una sólida sostenibilidad ambiental. Esto implica minimizar su huella ecológica, reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂ asociadas al hardware, como los centros de datos, y asegurar que el hardware para la IA no sea una fuente de contaminación. Para lograrlo, se requieren investigaciones e innovaciones en el uso de chips fabricados con materiales no contaminantes y técnicas eficientes de gestión energética que minimicen el consumo y claro está, reduzca los residuos contaminantes [32].

Tendencia de los factores de impacto ambiental de la IA

Con respecto al consumo energético, en la Fig. 1 [33] se puede observar la proyección de los centros de datos entre 2010 y 2030 en TWh (Teravatios hora). Se muestran tres escenarios: el mejor (línea azul), el esperado (línea roja) y el peor (línea verde). Desde el 2010, el consumo aumentó de forma constante, con una aceleración clara a partir del 2020. Para el 2030, se calcula que el consumo en el peor escenario alcanzaría 7,933 TWh, mientras que en el escenario esperado sería de 2,967 TWh y en el mejor llegaría a 1,137 TWh. Esto refleja el impacto energético creciente impulsado por la IA.



Fig. 1. Uso de energía eléctrica por Centro de Datos de IA (2010-2030)

Del mismo modo, la huella hídrica por consumo de la IA se puede observar en la Fig. 2 [34] entre los años 2018 y 2025. La curva azul evidencia un crecimiento constante y acelerado en el consumo de agua a lo largo del tiempo. Desde un valor aproximado de 500 millones de m³ en 2018, la cifra se eleva progresivamente hasta alcanzar cerca de 4,600 millones de m³ en 2025, destacando un impacto ambiental creciente en el recurso hídrico por la IA.

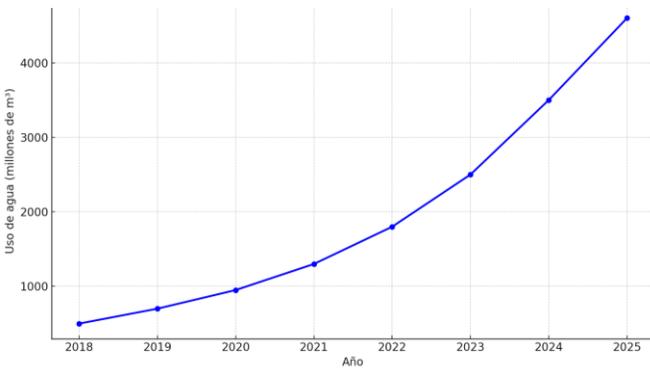


Fig. 2. Tendencia del uso de agua por IA (2018-2025)

Con respecto a los residuos electrónicos por el uso de minerales en IA, la Fig. 3 [35] muestra la proyección en diferentes escenarios con tasas de recolección y reciclaje formal futuro de desechos electrónicos; se representa la tasa formal de recolección en los años de 2010 a 2030. La línea negra muestra proyecta una tasa actual de 22%. A partir de 2023, se presentan cinco escenarios futuros: "Como en la actualidad" (20%), "Objetivo 2023" (30%), "Progresivo" (38%), "Ambicioso" (44%) y "Aspiracional" (60%). Cada uno refleja diferentes niveles de compromiso con el reciclaje electrónico. Se estima que los residuos electrónicos relacionados con la IA podrían alcanzar entre 1,2 y 5 millones de toneladas métricas, lo que representa un aumento de hasta 1.000 veces en comparación con 2023.

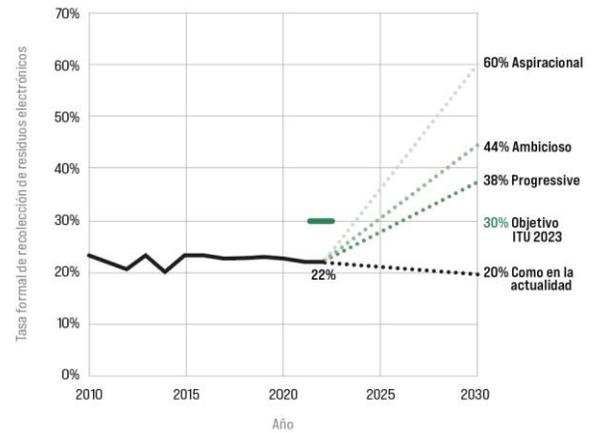


Fig. 3. Posibles tasas futuras de recolección y reciclaje formal de desechos electrónicos según escenarios

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En conclusión, el presente estudio reafirmó que, la inteligencia artificial (IA) ha revolucionado diversos sectores, ofreciendo avances significativos. Sin embargo, su creciente adopción ha revelado un impacto ambiental considerable, impulsado por el alto consumo energético de los centros de datos, la fabricación de chips y el entrenamiento de algoritmos complejos.

El estudio destaca que el ciclo de vida de la IA, tanto en su vertiente de software como de hardware, genera una huella ambiental significativa. El consumo energético, la huella hídrica, los residuos electrónicos y el uso de minerales son los principales factores de impacto. La investigación revela que la industria de la IA se dirige hacia una crisis energética, con un aumento exponencial en la demanda de electricidad que podría superar la capacidad de suministro en los próximos años.

Existen algunas pocas iniciativas, como el Acuerdo de Montreal que buscó establecer principios normativos para una ética de la inteligencia artificial, que deben difundirse a toda escala, especialmente en los gobiernos para una pronta acción e involucramiento.

Además, el estudio subraya la falta de regulación en muchos países, incluyendo el Perú, para medir y mitigar el impacto ambiental de la IA. Esta carencia de normas y acciones preventivas agrava el problema y exige una respuesta urgente por parte de las autoridades.

Si bien este estudio proporciona información valiosa sobre el impacto ambiental de la IA, es importante reconocer ciertas limitaciones. La falta de datos precisos sobre la demanda de minerales y la generación de residuos electrónicos dificulta una cuantificación precisa del impacto total. Futuras investigaciones podrían abordar esta limitación mediante el

desarrollo y aplicación de metodologías de medición más exhaustivas.

En base a estos hallazgos, se recomienda: desarrollar una legislación integral: Es fundamental que los Estados, como el Perú, implementen una legislación que establezca normas claras para medir, regular y mitigar el impacto ambiental de la IA. Esta legislación debe abordar aspectos como el consumo energético, la huella hídrica, la gestión de residuos electrónicos y el uso de minerales.

Se deben implementar medidas para optimizar el consumo energético de los centros de datos, incluyendo el uso de energías renovables, la mejora de la eficiencia de los equipos y la implementación de prácticas de gestión energética.

Es necesario fomentar la investigación y desarrollo de tecnologías de IA más eficientes y sostenibles, que minimicen el impacto ambiental. Esto incluye la exploración de nuevos materiales, algoritmos y arquitecturas de hardware.

Las empresas y organizaciones que utilizan IA deben ser transparentes sobre su impacto ambiental y rendir cuentas sobre sus prácticas. Se deben establecer mecanismos para medir y divulgar el consumo energético, la huella de carbono y otros indicadores ambientales.

Es esencial establecer un diálogo entre los diferentes actores involucrados, incluyendo gobiernos, empresas, investigadores y la sociedad civil, para abordar los desafíos ambientales de la IA de manera conjunta y coordinada.

Se deben adoptar medidas para reducir el impacto ambiental de la IA, como el reciclaje de residuos electrónicos, la gestión sostenible de los recursos hídricos y la promoción de prácticas de consumo responsable.

Es importante sensibilizar a la sociedad sobre el impacto ambiental de la IA y promover la educación sobre prácticas sostenibles en el uso de esta tecnología.

REFERENCES

- [1] R. Lahoz-Beltra, *Bioinformática: Simulación, vida artificial e inteligencia artificial*. Ediciones Díaz de Santos, 2010.
- [2] L. Rouhiainen, *Inteligencia artificial. 101 cosas que debes saber hoy sobre nuestro futuro*. Alienta, 2018. [Online]. Available: https://proassetspd.com.cdstatics2.com/usuaris/libros_contenido/arxi-us/40/39307_Inteligencia_artificial.pdf
- [3] E. Basáez and J. Mora, "Salud e inteligencia artificial: ¿cómo hemos evolucionado?," *Rev. Médica Clínica Las Condes*, vol. 33, no. 6, pp. 556–561, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.rmcl.2022.11.003.
- [4] O. R. Diez Pérez, "Informe de vigilancia tecnológica: Inteligencia artificial," 2021, [Online]. Available: <https://repositorio.concytec.gob.pe/entities/publication/f54d0db8-75b1-4dbe-8d60-355492b88874>
- [5] F. Miao, W. Holmes, R. Huang, and H. Zhang, *Inteligencia artificial y educación*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2021. Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.ciedupanama.org/handle/123456789/297>
- [6] V. Mendes, "A economia política da inteligência artificial: o caso da Alemanha," *Rev. Sociol. E Política*, vol. 30, p. e003, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1590/1678-98732230e003>.
- [7] "IA: Qué se espera en 2025 de la inteligencia artificial, el avance que marcó un antes y un después en la historia de la tecnología," *BBC News Mundo*, Dec. 29, 2024. Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/articles/c4gxzx0kpp60>
- [8] J. Iturmendi, "Inteligencia Artificial y Derechos Humanos: desafíos y oportunidades en la era digital. Introducción al monográfico," *Deusto J. Hum. Rights*, no. 14, Art. no. 14, Dec. 2024, doi: 10.18543/djhr.3202.
- [9] D. E. Araiz Huarte, "La Inteligencia Artificial como agente contaminante: concepto jurídico, impacto ambiental y futura regulación," *Actual. Juríd. Ambient.*, pp. 1–55, Jan. 2023, doi: 10.56398/ajacieda.00071.
- [10] S. Akter, M. M. Babu, U. Hani, S. Sultana, R. Bandara, and D. Grant, "Unleashing the power of artificial intelligence for climate action in industrial markets," *Ind. Mark. Manag.*, vol. 117, pp. 92–113, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.indmarman.2023.12.011.
- [11] C. R. Sampedro Guamán, S. A. Machuca Vivar, D. P. Palma Rivera, and B. E. Villalta Jadan, "Impacto ambiental por consumo de energía eléctrica en los Data Centers," *Dilemas Contemp. Educ. Política Valores*, vol. 8, no. SPE4, 2021, doi: 10.46377/dilemas.v8i.2786.
- [12] J. R. Hein, K. Mizell, A. Koschinsky, and T. A. Conrad, "Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources," *Ore Geol. Rev.*, vol. 51, pp. 1–14, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.oregeorev.2012.12.001.
- [13] D. Patterson *et al.*, "Carbon Emissions and Large Neural Network Training," Apr. 23, 2021, *arXiv: arXiv:2104.10350*. doi: 10.48550/arXiv.2104.10350.
- [14] IMPLAN, "ESG." Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://implan.com/esg/>
- [15] K. Crawford, "Generative AI's environmental costs are soaring — and mostly secret," *Nature*, vol. 626, no. 8000, pp. 693–693, Feb. 2024, doi: 10.1038/d41586-024-00478-x.
- [16] M. A. Mateus, "La dualidad de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las cadenas de suministro: una revisión narrativa," *Eur. Public Soc. Innov. Rev.*, vol. 9, pp. 1–21, Aug. 2024, doi: 10.31637/epsir-2024-552.
- [17] El Grand Continent, "La IA dispara el consumo de energía," El Grand Continent. Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://legrandcontinent.eu/es/2024/07/13/la-ia-dispara-el-consumo-de-energia/>
- [18] The Wall Street Journal, "Data-Center Market Is Booming Amid Shift to Cloud - WSJ." Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.wsj.com/articles/data-center-market-is-booming-amid-shift-to-cloud-11566252481>
- [19] D. Gelles, "La IA y su voraz consumo de energía atentan contra los objetivos climáticos," *The New York Times*, Jul. 19, 2024. Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.nytimes.com/es/2024/07/19/espanol/ia-energia-cambio-climatico.html>
- [20] United Nations, "Digital Economy Report 2024 | UN Trade and Development (UNCTAD)." Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://unctad.org/publication/digital-economy-report-2024>
- [21] National Geographic-España, "¿Sabes cuánta agua consume la IA?," National Geographic España. Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: https://www.nationalgeographic.com/es/ciencia/inteligencia-artificial-este-es-todo-agua-que-consume_20036
- [22] S. Falk, A. van Wynsberghe, and L. Biber-Freudenberger, "The attribution problem of a seemingly intangible industry," *Environ. Chall.*, vol. 16, p. 101003, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.envc.2024.101003.
- [23] ONU, "La IA plantea problemas ambientales. Esto es lo que el mundo puede hacer al respecto." Accessed: Feb. 11, 2025. [Online].

- Available: <https://www.unep.org/noticias-y-reportajes/reportajes/la-ia-plantea-problemas-ambientales-esto-es-lo-que-el-mundo-puede>
- [24] C. P. Baldé *et al.*, “THE GLOBAL E-WASTE MONITOR 2024,” 2024.
- [25] C.-J. Wu *et al.*, “Sustainable AI: Environmental Implications, Challenges and Opportunities,” Jan. 09, 2022, *arXiv*: arXiv:2111.00364. doi: 10.48550/arXiv.2111.00364.
- [26] M. A. Salazar, “La otra cara de la Inteligencia Artificial: estos podrían ser sus impactos ambientales en América Latina,” Noticias ambientales. Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://es.mongabay.com/2024/04/inteligencia-artificial-impactos-ambientales-america-latina/>
- [27] United Nations, “The UN Secretary-General’s Panel on Critical Energy Transition Minerals.” Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.un.org/en/climatechange/critical-minerals>
- [28] IEA, “End-of-life recycling rates for selected metals – Charts – Data & Statistics,” IEA. Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/end-of-life-recycling-rates-for-selected-metals>
- [29] Cad&Lan, “Eficiencia energética en data centers: Centros de datos.” Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.cadlan.com/noticias/eficiencia-energetica-en-data-centers/>
- [30] DCD, “Climate Neutral Data Center Pact - a progress report.” Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/climate-neutral-data-center-pact-a-progress-report/>
- [31] DCD, “¿Qué medidas están tomando los centros de datos para ser más sostenibles y reducir el cambio climático?” Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.datacenterdynamics.com/es/features/qu%C3%A9-medidas-est%C3%A1n-tomando-los-centros-de-datos-para-ser-m%C3%A1s-sostenibles-y-reducir-el-cambio-clim%C3%A1tico/>
- [32] F. Morandín-Ahuerma, “Declaración de Montreal Para Una Responsable: 10 Principios y 59 Recomendaciones (1st edition),” in *Principios normativos para una ética de la Inteligencia Artificial*, F. Morandín-Ahuerma, Ed., Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (Concytep), 2023, pp. 28–85. Accessed: Feb. 12, 2025. [Online]. Available: <https://philarchive.org/rec/MORDDM-2>
- [33] AMETIC, “El consumo energético de la IA generativa,” Observatorio IA. Accessed: Apr. 18, 2025. [Online]. Available: <https://observatorio-amic.ai/es/inteligencia-artificial-en-sostenibilidad/el-consumo-energetico-de-la-ia-generativa>
- [34] OECD, “How much water does AI consume? The public deserves to know.” Accessed: Apr. 18, 2025. [Online]. Available: <https://oecd.ai/en/wonk/how-much-water-does-ai-consume>
- [35] UNITAR, “The Global E-waste Monitor 2024,” E-Waste Monitor. Accessed: Apr. 18, 2025. [Online]. Available: <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>