

Article: Revisión

The environmental impact of artificial intelligence: challenges for the legal protection of ecosystems**Impacto ambiental de la inteligencia artificial: desafíos para la protección jurídica de los ecosistemas**¹Nestor Uriostegui Díaz  , ²María Guadalupe Valenzo Salgado  .¹ Universidad Autónoma de Guerrero - México, México² Universidad Autónoma de Guerrero - México, México***Corresponding author: Nestor Uriostegui Díaz** 

Submitted: 24-05-2026

Revised: 28-05-2026

Accepted: 15-06-2026

Published: 05-07-2026

Cite as:

Uriostegui Díaz, N., & Valenzo Salgado, M. G. (2026). Impacto ambiental de la inteligencia artificial: desafíos para la protección jurídica de los ecosistemas. *Sapiens Law and Justice*, 3(4), 001. <https://doi.org/10.71068/SLJ00001>

ABSTRACT

The development and use of artificial intelligence have had an impact on society and brought benefits in various areas; however, they have also raised new environmental challenges that call for careful consideration. The objective of this research was to analyze the main environmental impacts caused by the development and operation of artificial intelligence systems; it also sought to examine the legal protection of ecosystems in the face of the challenges posed by this technology. The methodology employed was a qualitative research approach, utilizing analytical and legal-dogmatic methods, with a documentary analysis technique. The findings revealed that artificial intelligence has a significant impact on ecosystems and that Mexico's environmental regulatory frameworks have limitations in addressing the risks arising from the development and use of AI. It was concluded that the development of artificial intelligence introduces a new dimension of environmental risks that necessitates modifying the current legal protection of ecosystems.

Keywords: artificial intelligence; environmental impact; legal protection; ecosystems.**RESUMEN**

El desarrollo y uso de la inteligencia artificial ha impactado en la vida de la sociedad, ha beneficiado en distintos ámbitos, sin embargo, también ha planteado nuevos desafíos ambientales que exigen una reflexión. El objetivo de esta investigación fue analizar las principales afectaciones ambientales que origina el desarrollo y operación de sistemas de inteligencia artificial, así mismo, se buscó examinar la protección jurídica de los ecosistemas frente a los desafíos que genera esta tecnología. La metodología que se empleó fue una investigación con enfoque cualitativo, se utilizaron los métodos analítico y dogmático-jurídico, la técnica empleada fue documental. Los hallazgos evidenciaron que la inteligencia artificial genera un impacto significativo sobre los ecosistemas y que los marcos regulatorios de México en materia ambiental tienen limitaciones para abordar los riesgos que derivan del desarrollo y uso de la IA. Se concluyó que el desarrollo de la inteligencia artificial plantea una nueva dimensión de riesgos ambientales que obliga a modificar la protección jurídica actual de los ecosistemas.

Palabras clave: inteligencia artificial; impacto ambiental; protección jurídica; ecosistemas.

INTRODUCCIÓN

La inteligencia artificial (IA) se ha incorporado con rapidez a actividades productivas, educativas, administrativas, científicas y gubernamentales. Sus aplicaciones permiten procesar grandes volúmenes de información, automatizar decisiones, reconocer patrones y generar contenidos; sin embargo, estas capacidades dependen de una infraestructura material integrada por centros de datos, redes de telecomunicaciones, procesadores especializados, dispositivos y sistemas de refrigeración. Por ello, la IA no debe analizarse como un recurso exclusivamente inmaterial. Su ciclo de vida demanda electricidad, agua y materias primas, y produce emisiones y residuos que pueden trasladarse entre territorios y etapas de la cadena tecnológica (1,2).

El debate ambiental se intensificó con la expansión de modelos de propósito general y sistemas generativos. El entrenamiento de modelos de gran escala concentra una parte visible del consumo computacional, pero la inferencia repetida por millones de usuarios puede convertirse en una carga acumulativa igualmente relevante. Kaack et al. explicaron que la relación entre IA y cambio climático es ambivalente: la tecnología puede favorecer la mitigación y la adaptación, aunque su infraestructura también genera emisiones y presiones materiales (3). De Vries advirtió que el crecimiento acelerado de la IA generativa podría elevar la demanda eléctrica de los centros de datos si el aumento de uso supera las mejoras de eficiencia (4).

La huella ambiental no es uniforme. Luccioni et al. comprobaron que las tareas generativas suelen consumir más energía que las clasificatorias, pero también observaron variaciones importantes entre modelos, arquitecturas y tipos de salida (5). Patterson et al. mostraron que la eficiencia del hardware, la ubicación del procesamiento y la intensidad de carbono de la red eléctrica pueden modificar sustancialmente las emisiones del entrenamiento (6). Dodge et al. añadieron que la intensidad de carbono cambia según la región y el momento de ejecución, de modo que dos cargas computacionales equivalentes no necesariamente producen el mismo impacto (7). Estas diferencias impiden atribuir una cifra única a toda aplicación de IA.

La discusión tampoco puede limitarse al carbono. Los centros de datos requieren agua directa para ciertos sistemas de refrigeración e indirecta para generar electricidad. Además, la fabricación de servidores y aceleradores demanda minerales, productos químicos y procesos industriales intensivos. La sustitución frecuente de equipos incrementa el volumen de residuos electrónicos y desplaza parte de los daños hacia territorios donde se extraen materiales o se reciben desechos. Bender et al. señalaron que la carrera por modelos cada vez mayores debe examinarse junto con sus costes ambientales y distributivos, pues los beneficios y las cargas no recaen necesariamente sobre las mismas poblaciones (8).

Esta materialidad plantea un problema para el derecho ambiental. Los ordenamientos fueron contruidos principalmente alrededor de fuentes industriales identificables, proyectos territorialmente delimitados y contaminantes susceptibles de medición directa. En cambio, una aplicación de IA puede distribuir su procesamiento entre varios centros de datos, utilizar servicios de nube ubicados fuera de la jurisdicción y depender de cadenas globales de suministro. La fragmentación dificulta identificar al responsable, definir el límite de la evaluación y determinar qué

autoridad debe exigir información, medidas preventivas o reparación. La ausencia de transparencia empresarial agrava esta dificultad, porque muchos datos sobre energía, agua, emisiones y renovación de hardware no se divulgan con criterios comparables.

En México existen fundamentos jurídicos aplicables, entre ellos el derecho constitucional a un medio ambiente sano, los principios preventivos de la legislación ambiental y las reglas sobre evaluación de impacto, agua, energía y residuos. No obstante, esas disposiciones no establecen métricas específicas para la huella de sistemas de IA ni obligaciones homogéneas de reporte para sus proveedores y operadores. El problema no consiste en una ausencia total de normas, sino en su insuficiente articulación frente a una infraestructura digital que combina impactos globales con efectos locales sobre cuencas, redes eléctricas, suelo, biodiversidad y comunidades.

A partir de esta situación se formuló el siguiente problema de investigación: ¿de qué manera los impactos ambientales asociados con el ciclo de vida de la IA desafían los instrumentos jurídicos disponibles para proteger los ecosistemas, especialmente en el contexto mexicano? El objetivo general fue analizar las principales afectaciones ambientales derivadas del desarrollo y operación de sistemas de IA y evaluar los desafíos que plantean para la protección jurídica de los ecosistemas. De manera complementaria se buscó identificar las dimensiones de impacto más relevantes, examinar el alcance de los instrumentos regulatorios y proponer criterios para una gobernanza preventiva, proporcional y verificable.

El estudio partió del supuesto de que la regulación ambiental general ofrece bases para intervenir, pero resulta insuficiente cuando no se acompaña de información técnica, delimitación del ciclo de vida y deberes diferenciados para desarrolladores, proveedores de nube, operadores de centros de datos y usuarios institucionales. La investigación es pertinente porque conecta dos discusiones que suelen aparecer separadas: la sostenibilidad de la infraestructura digital y la protección jurídica de los ecosistemas. Esta articulación permite evitar tanto una lectura tecnofóbica, que desconozca las aportaciones de la IA, como una visión tecnosolucionista que ignore sus costes físicos y sociales.

LITERATURE REVIEW

Materialidad y ciclo de vida de la inteligencia artificial

La evaluación ambiental de la IA exige observar todo su ciclo de vida. Ligozat et al. propusieron incluir la producción de equipos, el entrenamiento, la inferencia, el almacenamiento, la transmisión de datos y el fin de vida, porque una medición limitada al consumo operativo puede ocultar transferencias de impacto hacia materiales, agua o residuos (1). Esta perspectiva también permite distinguir la huella incorporada del hardware de la huella producida durante su uso. La primera comprende extracción, fabricación y transporte; la segunda depende de la energía, la intensidad de utilización y las condiciones del centro de datos.

Van Wynsberghe diferenció la IA para la sostenibilidad de la sostenibilidad de la IA (9). La primera utiliza algoritmos para atender problemas ambientales; la segunda pregunta si el propio desarrollo tecnológico respeta la integridad ecológica y la justicia social. Esta distinción es decisiva: una herramienta destinada a monitorear bosques no es automáticamente sostenible si emplea

infraestructura desproporcionada, prolonga cadenas extractivas o desplaza daños hacia comunidades vulnerables. La legitimidad ambiental depende de comparar beneficios verificables con costes directos, indirectos y acumulativos.

Energía, emisiones y efectos de escala

El consumo energético varía según el tamaño del modelo, la arquitectura, el hardware, el ajuste, la cantidad de consultas y la eficiencia del centro de datos. Desislavov et al. observaron mejoras continuas en la eficiencia de la inferencia, pero advirtieron que la expansión del uso puede neutralizarlas mediante un efecto rebote (10). Xiao et al. proyectaron que las decisiones sobre eficiencia, ubicación y descarbonización de la red modifican de forma considerable las trayectorias de energía, agua y carbono de los servidores de IA (11). Por tanto, la eficiencia por operación no garantiza una reducción absoluta si crecen el número de servicios y la frecuencia de utilización.

Las emisiones dependen de la electricidad consumida y de la fuente que la produce. La programación temporal y la selección geográfica de cargas pueden reducir la intensidad de carbono (7), mientras que el diseño de modelos y centros de datos más eficientes disminuye el consumo por tarea (6). Sin embargo, Bender et al. y Dauvergne cuestionaron que la eficiencia empresarial equivalga por sí misma a sostenibilidad, ya que puede estimular mayor producción y ocultar desigualdades en la distribución de costes (8,12). La medición debe informar consumo, localización, matriz eléctrica, alcance de emisiones y supuestos utilizados.

Agua, minerales y residuos electrónicos

Mytton explicó que el análisis hídrico de los centros de datos debe diferenciar extracción y consumo, así como uso directo e indirecto (13). El mismo volumen adquiere significados distintos según la disponibilidad de la cuenca, el clima, la tecnología de refrigeración y la competencia con usos humanos o ecosistémicos. Una cifra global puede resultar engañosa si no se relaciona con el estrés hídrico local. Esto justifica evaluaciones territoriales, divulgación de la eficiencia hídrica y participación de comunidades potencialmente afectadas.

La dimensión material incluye minerales críticos, semiconductores, baterías, cableado y equipos auxiliares. La fabricación concentra impactos químicos y energéticos, mientras que la renovación acelerada aumenta los residuos electrónicos. El Global E-waste Monitor documentó que el crecimiento de estos residuos supera la capacidad formal de recolección y reciclaje en numerosas regiones (14). La economía circular debe priorizar durabilidad, reparación, reutilización, recuperación de materiales y responsabilidad extendida, sin asumir que el reciclaje elimina todos los daños de la extracción primaria.

La relación entre agua, energía y materiales demuestra que los indicadores deben interpretarse conjuntamente. Un sistema de refrigeración puede reducir el uso directo de agua y, al mismo tiempo, aumentar la electricidad requerida; una red con menor carbono puede depender de fuentes con diferentes repercusiones hídricas o territoriales. Del mismo modo, un procesador más eficiente puede incorporar una huella elevada de fabricación que solo se compensa si permanece en servicio durante

un periodo suficiente. Estas compensaciones justifican análisis multicriterio y evitan declarar sostenible una solución a partir de un único resultado favorable.

Beneficios ambientales y gobernanza sostenible

La IA puede contribuir a pronósticos climáticos, redes eléctricas, agricultura de precisión, detección de deforestación, conservación de biodiversidad y respuesta ante desastres. Rolnick et al. sistematizaron aplicaciones con potencial para mitigación y adaptación, pero insistieron en la colaboración con especialistas sectoriales y en la evaluación de efectos reales (15). Tomlinson et al. mostraron que la comparación ambiental depende de la unidad funcional y de la alternativa considerada, por lo que las afirmaciones sobre superioridad de la IA deben delimitar tarea, calidad y ciclo de vida (16).

Zhao sostuvo que la IA sostenible requiere regulación preventiva, responsabilidad corporativa y reportes verificables (17). Francisco y Linnér observaron que los organismos internacionales suelen presentar la IA como herramienta para el desarrollo sostenible, aunque esa narrativa puede subestimar conflictos, incertidumbres y relaciones de poder (18). Batool et al. identificaron una gobernanza fragmentada entre niveles organizacionales, nacionales e internacionales (19). Pagallo concluyó que el Reglamento Europeo contiene varios mecanismos ambientales, pero sus alcances son desiguales y todavía requieren articulación con el derecho ambiental sectorial (20).

La literatura converge en tres exigencias de gobernanza. La primera es transparencia sobre recursos y límites metodológicos; la segunda es proporcionalidad, para que las obligaciones aumenten con la escala y el riesgo; y la tercera es participación, especialmente cuando la infraestructura compite por agua, energía o territorio. Estas exigencias complementan la responsabilidad posterior al daño con medidas preventivas desde el diseño. También permiten distinguir entre aplicaciones de bajo impacto y operaciones capaces de producir presiones acumulativas, evitando que toda la IA reciba un tratamiento jurídico idéntico.

METHOD

La investigación adoptó un enfoque cualitativo, diseño no experimental y alcance analítico-documental. Se utilizaron los métodos analítico y dogmático-jurídico. El primero permitió descomponer la huella ambiental de la IA en dimensiones energéticas, climáticas, hídricas, materiales y residuales; el segundo permitió interpretar normas, principios e instrumentos aplicables a la protección de los ecosistemas y valorar su suficiencia frente a los riesgos identificados. El estudio no pretendió estimar una huella universal ni establecer relaciones causales, sino integrar evidencia científica y jurídica para construir una explicación crítica del problema.

La búsqueda documental comprendió publicaciones difundidas entre 2021 y 2026, con prioridad para artículos indexados en Scopus y documentos institucionales o normativos indispensables. Se consultaron términos en español e inglés relacionados con artificial intelligence, environmental impact, sustainable AI, energy consumption, carbon emissions, water footprint, electronic waste, ecosystem protection, environmental law y AI governance. Se incorporaron artículos revisados por pares con relación directa con la materialidad de la IA, sus aplicaciones ambientales o su regulación;

también se incluyeron la Constitución mexicana, legislación ambiental, instrumentos internacionales y el Reglamento Europeo de Inteligencia Artificial.

Se excluyeron documentos duplicados, textos sin trazabilidad editorial, publicaciones meramente promocionales y trabajos que mencionaban la sostenibilidad sin analizar efectos ambientales o jurídicos. La selección fue intencional y temática, propia de una revisión narrativa con análisis jurídico, por lo que no siguió un protocolo de revisión sistemática ni pretende exhaustividad bibliométrica. Esta precisión evita atribuir al procedimiento un nivel de reproducibilidad que no corresponde a su diseño. Las fuentes científicas se contrastaron con publicaciones editoriales y registros DOI para reducir errores de identificación.

La extracción se realizó mediante una matriz que registró autoría, año, objeto, tipo de evidencia, dimensión ambiental, hallazgos, limitaciones y posible relevancia jurídica. Posteriormente se aplicó codificación temática en cuatro ejes: infraestructura, energía y emisiones; agua, materiales y residuos; beneficios ambientales de la IA; y gobernanza jurídica. La comparación buscó coincidencias, desacuerdos y condiciones que explicaran la variación entre estudios. En la dimensión jurídica se examinaron prevención, precaución, información, participación, evaluación de impacto, responsabilidad y economía circular.

El análisis se desarrolló en tres momentos. Primero, se identificaron los impactos respaldados por evidencia y sus principales factores de variación. Segundo, se vinculó cada impacto con instrumentos jurídicos potencialmente aplicables en México. Tercero, se contrastaron los hallazgos con propuestas internacionales de gobernanza. La investigación utilizó documentos de acceso público y no involucró personas, animales ni datos personales; por ello no requirió consentimiento informado. Se respetaron la integridad académica, la atribución de fuentes y la presentación prudente de resultados.

RESULTS

Dimensiones ambientales identificadas

El análisis identificó cinco dimensiones interrelacionadas: energía, emisiones, agua, materiales y residuos electrónicos. Su intensidad no depende exclusivamente del número de parámetros de un modelo. También intervienen la arquitectura, el hardware, la duración del entrenamiento, las tareas de ajuste, la frecuencia de inferencia, el centro de datos, la fuente eléctrica y la vida útil del equipo. Este resultado confirma que la huella debe expresarse mediante un conjunto de indicadores y no mediante una única cifra agregada (1,5-7,10).

En energía y emisiones, la evidencia coincidió en que la inferencia merece la misma atención que el entrenamiento cuando una aplicación alcanza gran escala. Las mejoras de eficiencia reducen el consumo unitario, pero el efecto agregado puede aumentar si se multiplican usuarios, consultas y productos (4,10,11). Se identificó además una fuerte dependencia espacial y temporal: la intensidad de carbono cambia con la red eléctrica y con la hora de procesamiento (6,7). Por ello, los reportes deben distinguir energía absoluta, eficiencia por tarea, emisiones de alcance operativo y emisiones incorporadas.

En agua, los documentos revisados mostraron que la refrigeración es solo una parte del problema. También existe consumo indirecto asociado con la generación eléctrica y con la fabricación de componentes. El riesgo ambiental depende de la cuenca y no únicamente del volumen global. Una instalación eficiente en términos promedio puede resultar problemática en una región sometida a sequía o con competencia entre abastecimiento humano, agricultura y conservación (11,13). El indicador de eficiencia hídrica debe acompañarse de información territorial y estacional.

En materiales y residuos, el resultado principal fue la necesidad de ampliar los límites del sistema. La extracción y refinación de minerales, la fabricación de semiconductores y la sustitución de servidores producen cargas que rara vez aparecen en las declaraciones sobre IA. La rápida evolución del hardware puede acortar la vida útil económica de equipos aún funcionales. Este patrón incrementa el riesgo de exportación de residuos y tratamiento informal, con efectos sobre suelo, agua y salud (1,14). La Tabla 1 resume la evidencia central y su implicación regulatoria.

Tabla 1. Síntesis de evidencia e implicaciones regulatorias

Fuente	Dimensión	Hallazgo relevante	Implicación jurídica
Ligozat et al. (1)	Ciclo de vida	La huella incluye fabricación, uso y fin de vida	Exigir límites, indicadores y trazabilidad del ciclo completo
Luccioni et al. (5)	Energía por tarea	El consumo varía entre tareas generativas y clasificatorias	Evitar métricas únicas; reportar modelo, tarea y volumen
Xiao et al. (11)	Energía, agua y carbono	Eficiencia, ubicación y red modifican la trayectoria ambiental	Incorporar evaluación territorial y escenarios
Mytton (13)	Agua	El riesgo depende de consumo, extracción y contexto hídrico	Informar cuenca, estacionalidad y tecnología de refrigeración
Global E-waste Monitor (14)	Residuos	La generación supera el reciclaje formal	Fortalecer circularidad y responsabilidad extendida

Nota. Elaboración propia con base en las fuentes indicadas.

Alcance y vacíos de la protección jurídica

El análisis jurídico mostró que México dispone de una base normativa, pero no de un régimen integrado para la huella ambiental de la IA. La Constitución reconoce el derecho a un medio ambiente sano (21), y la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente incorpora instrumentos de política, prevención y evaluación (22). La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos ofrece herramientas para materiales y desechos tecnológicos (23). No obstante, estas normas no definen obligaciones específicas para medir modelos, servicios de nube o cadenas de suministro digitales.

Se identificaron cuatro vacíos operativos. Primero, no existe una metodología uniforme y obligatoria para energía, carbono, agua y materiales. Segundo, la información suele quedar en manos de proveedores privados y se publica de manera agregada. Tercero, la distribución transfronteriza del procesamiento dificulta atribuir impactos y responsabilidades. Cuarto, la evaluación ambiental

tradicional se concentra en instalaciones físicas y puede no capturar la demanda inducida por servicios digitales específicos. La Tabla 2 relaciona estos vacíos con instrumentos jurídicos disponibles y medidas de fortalecimiento.

La Recomendación de la UNESCO reconoce la protección ambiental dentro de la ética de la IA y promueve la reducción de impactos, aunque carece de exigibilidad directa (24). El Reglamento Europeo 2024/1689 exige documentación y contempla consideraciones ambientales, pero su estructura basada en riesgos de seguridad y derechos fundamentales no sustituye al derecho ambiental (25). El Acuerdo de Escazú aporta principios de información, participación y justicia ambiental relevantes para comunidades afectadas por centros de datos o cadenas extractivas (26). El resultado conjunto apunta a una regulación articulada, no a una ley aislada de IA.

Un resultado adicional fue la ausencia de una correspondencia automática entre actor tecnológico e impacto. El desarrollador decide arquitectura y tamaño; el proveedor de nube controla parte del hardware, la localización y la energía; el operador del centro de datos administra refrigeración e infraestructura; y el usuario institucional determina frecuencia y finalidad. La responsabilidad debe asignarse según conocimiento, control y capacidad de prevención. Una obligación indiferenciada podría dejar sin respuesta los impactos principales o imponer cargas a quien no dispone de información ni facultades para reducirlos.

Tabla 2. Problemáticas para la protección jurídica de los ecosistemas frente a la IA en México

Problemática derivada de la IA	Impacto ambiental	Vacíos legales	Marco jurídico donde debe establecerse
Demanda de agua en centros de datos	La refrigeración y la electricidad pueden aumentar la presión sobre cuencas y otros usuarios	Faltan métricas obligatorias, datos por cuenca y evaluación acumulativa	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y legislación ambiental aplicable
Demanda energética y emisiones	El impacto depende del consumo, la matriz eléctrica, la escala y la ubicación	No hay reporte uniforme de energía y emisiones por servicio	Legislación ambiental, energética y de evaluación de impacto
Generación de residuos electrónicos	Contaminación de suelo, agua y aire	La trazabilidad, reutilización y responsabilidad extendida son insuficientes	Legislación sobre residuos y economía circular
Falta de transparencia ambiental	La falta de datos comparables impide valorar impactos y alternativas	Faltan divulgación verificable y auditoría independiente	Legislación ambiental y obligaciones de información
Ausencia de regulación específica de la IA y el medioambiente	Las normas ambientales fueron diseñadas para actividades industriales tradicionales	Existe regulación general, pero falta articulación específica y técnica	Legislación ambiental y futura regulación de IA

Nota. Elaboración propia con base en el análisis jurídico realizado.

DISCUSSION

Los resultados confirman que la materialidad de la IA debe constituir el punto de partida del análisis jurídico. Esta conclusión coincide con Ligozat et al., quienes defendieron una evaluación de ciclo de

vida, y con van Wynsberghe, quien distinguió entre usar IA con fines sostenibles y hacer sostenible la propia IA (1,9). La contribución del presente estudio consiste en trasladar esa distinción al campo de la protección de ecosistemas: no basta con acreditar que una aplicación persigue un beneficio ambiental; también debe demostrarse que su diseño, infraestructura y escala no generan cargas desproporcionadas o desplazadas.

En materia energética, los hallazgos convergen con de Vries y Luccioni et al. respecto al crecimiento potencial del consumo asociado con aplicaciones generativas (4,5). Sin embargo, la revisión matiza las interpretaciones deterministas. Patterson et al. y Dodge et al. evidenciaron que la eficiencia del modelo, la localización y el momento de ejecución alteran significativamente las emisiones (6,7). Desislavov et al. añadieron que la inferencia se vuelve central por su repetición masiva (10). En consecuencia, una norma basada solo en tamaño del modelo sería insuficiente; debería combinar consumo absoluto, intensidad por servicio, volumen de uso y matriz eléctrica.

La comparación con Xiao et al. refuerza la importancia de la ubicación. Sus escenarios muestran que eficiencia, distribución espacial y descarbonización producen trayectorias ambientales distintas (11). Jurídicamente, esta variación respalda evaluaciones territoriales antes de autorizar infraestructura de gran escala. También impide aceptar compensaciones generales como sustituto automático de la prevención local. Una reducción de carbono obtenida mediante determinada fuente eléctrica puede coexistir con mayor presión hídrica; por ello, las autoridades deben examinar simultáneamente energía, agua, biodiversidad y usos competidores del territorio.

El componente hídrico coincide con Mytton en que las cifras deben distinguir extracción, consumo y origen del agua (13). La aportación jurídica es que esa distinción debe convertirse en una obligación de información vinculada con cuencas específicas. Los promedios corporativos globales no permiten valorar afectaciones locales ni garantizar participación. En regiones con estrés hídrico, la autorización debería considerar disponibilidad, estacionalidad, tecnología de refrigeración, alternativas técnicas y efectos acumulativos. Esta exigencia no implica prohibir centros de datos, sino someter sus decisiones de localización a criterios ambientales verificables.

Respecto de materiales y residuos, el resultado amplía el debate más allá de los centros de datos. El Global E-waste Monitor muestra una brecha persistente entre generación y reciclaje formal (14). Si la demanda de aceleradores reduce la vida económica de equipos, el problema no se resuelve únicamente con eficiencia energética. El derecho debe promover durabilidad, reparación, reutilización, trazabilidad y responsabilidad extendida. La LGPGIR proporciona una base, pero la especificidad de componentes digitales y cadenas transfronterizas requiere normas técnicas y coordinación aduanera. También se necesita evitar que la economía circular legitime un consumo ilimitado bajo la promesa de reciclaje futuro.

Los beneficios ambientales identificados concuerdan con Kaack et al. y Rolnick et al., quienes describieron aplicaciones para mitigación, adaptación y monitoreo (3,15). No obstante, Dauvergne advirtió que las promesas de eficiencia pueden ocultar efectos rebote y relaciones de poder en cadenas globales (12). Esta tensión explica por qué la evaluación debe comparar la IA con alternativas reales y no con un escenario sin intervención. Tomlinson et al. mostraron que la unidad funcional

cambia el resultado de las comparaciones (16); una aplicación solo puede considerarse preferible cuando ofrece calidad equivalente y beneficios medibles.

En gobernanza, los resultados apoyan la propuesta de Zhao sobre marcos preventivos, tecnológicamente neutrales y respaldados por reportes corporativos (17). A la vez, coinciden con Francisco y Linnér en que la narrativa internacional de IA para la sostenibilidad necesita un examen crítico (18). Batool et al. evidenciaron diversidad institucional y fragmentación regulatoria (19). Para México, esto significa que la respuesta no debería copiar mecánicamente modelos extranjeros. Debe integrar competencias federales y locales, normas ambientales, regulación energética, gestión de agua y residuos, y obligaciones aplicables a proveedores internacionales.

El contraste con Pagallo revela límites en el referente europeo. Aunque el Reglamento de IA incorpora menciones ambientales y mecanismos de documentación, no todos poseen la misma fuerza ni cubren el ciclo de vida completo (20,25). Su utilidad para México radica en mostrar que la gobernanza tecnológica puede exigir trazabilidad y documentación, pero la evaluación sustantiva de daños debe permanecer conectada con el derecho ambiental. La UNESCO aporta principios de sostenibilidad (24), mientras que Escazú fortalece información, participación y acceso a justicia (26). Articular estos instrumentos permite pasar de compromisos generales a procedimientos exigibles.

A partir de la confrontación, se propone un esquema de gobernanza con cinco componentes. El primero es medición multivariable de energía, carbono, agua, materiales y residuos. El segundo es divulgación pública con métricas comparables y verificación independiente. El tercero es evaluación territorial para infraestructura de alta demanda. El cuarto es debida diligencia de ciclo de vida, incluida la cadena de suministro. El quinto es responsabilidad diferenciada entre desarrolladores, proveedores de nube, operadores y usuarios institucionales. La intensidad de las obligaciones debe ser proporcional a escala, riesgo, ubicación y capacidad de control.

La discusión también identifica límites. La evidencia disponible utiliza unidades funcionales, fronteras y supuestos heterogéneos, lo que impide comparar directamente todas las estimaciones. La opacidad empresarial reduce la disponibilidad de datos primarios. Además, esta revisión fue narrativa y jurídica, no sistemática ni metaanalítica. Por tanto, sus resultados organizan problemas y criterios regulatorios, pero no calculan una huella global ni prueban causalidad. Futuras investigaciones deberían medir instalaciones concretas en México, analizar permisos y cuencas, estudiar cadenas de residuos y evaluar la eficacia de instrumentos antes y después de su aplicación.

Las implicaciones prácticas alcanzan a autoridades, empresas y universidades. Las autoridades pueden incorporar anexos digitales en la evaluación ambiental y criterios de huella en la contratación pública. Las empresas pueden establecer inventarios por servicio, metas absolutas y auditorías externas, además de conservar evidencia sobre modelos y proveedores. Las universidades pueden incluir alfabetización ambiental en programas de ciencia de datos y derecho tecnológico. Estas acciones no sustituyen la regulación, pero generan capacidades para interpretar indicadores, cuestionar declaraciones ambientales y diseñar soluciones que reduzcan impactos desde las primeras decisiones del proyecto.

La efectividad del esquema propuesto dependerá de la calidad de los datos y de su posibilidad de fiscalización. Un reporte voluntario puede mejorar la información, pero no garantiza comparabilidad si cada empresa elige métricas, periodos y fronteras diferentes. Por ello, conviene establecer un contenido mínimo: energía total y por servicio, emisiones según ubicación, consumo y extracción de agua, vida útil del hardware, residuos generados y destino acreditado. La información comercial sensible puede protegerse sin impedir que autoridades y sociedad conozcan los indicadores necesarios para evaluar daños, cumplimiento y progreso. También resulta necesario distinguir metas de intensidad de reducciones absolutas. Una organización puede disminuir la energía por consulta y aumentar simultáneamente su consumo total debido a la expansión del servicio. La combinación de ambos indicadores permite detectar el efecto rebote y evita presentar eficiencia relativa como si fuera una reducción neta. Finalmente, la verificación independiente debe revisar no solo cálculos, sino también calidad de datos, exclusiones y trazabilidad de proveedores, porque las omisiones metodológicas pueden alterar más el resultado que pequeñas diferencias de precisión.

CONCLUSIONS

Primera. La inteligencia artificial posee una base material cuya huella comprende energía, emisiones, agua, minerales, fabricación de equipos y residuos electrónicos. El análisis confirmó que esa huella no puede representarse mediante una cifra universal, porque cambia según el modelo, la tarea, el hardware, el volumen de inferencias, la matriz eléctrica, el sistema de refrigeración y la ubicación. En consecuencia, cualquier evaluación jurídica o ambiental debe declarar los límites del sistema, la unidad funcional, las fuentes de datos y las etapas del ciclo de vida incluidas.

Segunda. El derecho ambiental mexicano contiene fundamentos suficientes para reconocer y prevenir parte de los riesgos, especialmente mediante el derecho a un medio ambiente sano, la evaluación de impacto y las reglas sobre agua y residuos. Sin embargo, carece de métricas y deberes específicos que permitan atribuir la huella de servicios de IA distribuidos. La prioridad no debería ser crear una prohibición tecnológica general, sino articular los instrumentos existentes con obligaciones proporcionales de medición, divulgación, evaluación territorial y debida diligencia para los actores que controlan infraestructura y decisiones.

Tercera. La regulación debe tratar de manera integrada energía, carbono, agua, materiales y residuos, pues una mejora en una dimensión puede trasladar el daño a otra. La instalación de centros de datos exige especial atención a la cuenca, la red eléctrica y los efectos acumulativos del territorio. Los indicadores corporativos globales son insuficientes para proteger comunidades y ecosistemas locales. Se requieren datos desagregados, metodologías comparables, verificación independiente y mecanismos de participación que permitan valorar alternativas de localización, refrigeración, abastecimiento energético, adquisición responsable y gestión del hardware durante toda su vida útil.

Cuarta. La IA puede apoyar la acción climática, la conservación y la gestión de recursos, pero ese beneficio no elimina su propia huella. Cada aplicación ambiental debe compararse con alternativas técnicamente viables, utilizando una unidad funcional que incluya calidad, escala y ciclo de vida. El criterio de sostenibilidad debe exigir que el beneficio verificable justifique los recursos empleados y

que no se desplacen costes hacia territorios o poblaciones con menor capacidad de defensa. Esta evaluación previene tanto el rechazo indiscriminado como el tecnosolucionismo sin evidencia.

Quinta. Una gobernanza ambientalmente responsable de la IA requiere coordinación entre derecho ambiental, regulación tecnológica, energía, agua, residuos y acceso a la información. El estudio propone combinar medición multivariable, transparencia pública, evaluación territorial, circularidad del hardware y responsabilidad diferenciada. Debido al carácter narrativo y documental de la revisión, estas conclusiones no equivalen a una estimación empírica de la huella mexicana. Se recomienda desarrollar estudios de caso con datos primarios, analizar proyectos concretos, incorporar la perspectiva de comunidades potencialmente afectadas y evaluar posteriormente la eficacia de las medidas regulatorias adoptadas.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

1. Ligozat AL, Lefevre J, Bugeau A, Combaz J. Unraveling the hidden environmental impacts of AI solutions for environment: life cycle assessment of AI solutions. *Environ Model Softw*. 2022;146:105182. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105182>
2. OECD. Measuring the environmental impacts of artificial intelligence compute and applications: the AI footprint. Paris: OECD Publishing; 2022. <https://doi.org/10.1787/7babf571-en>
3. Kaack LH, Donti PL, Strubell E, Kamiya G, Creutzig F, Rolnick D. Aligning artificial intelligence with climate change mitigation. *Nat Clim Chang*. 2022;12:518-527. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01377-7>
4. de Vries A. The growing energy footprint of artificial intelligence. *Joule*. 2023;7(10):2191-2194. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.09.004>
5. Luccioni AS, Jernite Y, Strubell E. Power hungry processing: watts driving the cost of AI deployment? In: *Proceedings of the 2024 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*. New York: ACM; 2024. p. 85-99. <https://doi.org/10.1145/3630106.3658542>
6. Patterson D, Gonzalez J, Le Q, Liang C, Munguia LM, Rothchild D, et al. Carbon emissions and large neural network training. *Computer*. 2022;55(7):18-28. <https://doi.org/10.1109/MC.2022.3148714>
7. Dodge J, Prewitt T, Tachet des Combes R, Odmark E, Schwartz R, Strubell E, et al. Measuring the carbon intensity of AI in cloud instances. In: *Proceedings of the 2022 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*. New York: ACM; 2022. p. 1877-1894. <https://doi.org/10.1145/3531146.3533234>
8. Bender EM, Gebru T, McMillan-Major A, Shmitchell S. On the dangers of stochastic parrots: can language models be too big? In: *Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*. New York: ACM; 2021. p. 610-623. <https://doi.org/10.1145/3442188.3445922>
9. van Wynsberghe A. Sustainable AI: AI for sustainability and the sustainability of AI. *AI Ethics*. 2021;1:213-218. <https://doi.org/10.1007/s43681-021-00043-6>
10. Desislavov R, Martínez-Plumed F, Hernández-Orallo J. Trends in AI inference energy consumption: beyond the performance-vs-parameter laws of deep learning. *Sustain Comput Inform Syst*. 2023;38:100857. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100857>

11. Xiao T, Fuso Nerini F, Matthews HD, Tavoni M, You F. Environmental impact and net-zero pathways for sustainable artificial intelligence servers in the USA. *Nat Sustain*. 2025;8:1541-1553. <https://doi.org/10.1038/s41893-025-01681-y>
12. Dauvergne P. Is artificial intelligence greening global supply chains? Exposing the political economy of environmental costs. *Rev Int Polit Econ*. 2022;29(3):696-718. <https://doi.org/10.1080/09692290.2020.1814381>
13. Mytton D. Data centre water consumption. *npj Clean Water*. 2021;4:11. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00101-w>
14. International Telecommunication Union, United Nations Institute for Training and Research. The global e-waste monitor 2024. Geneva: ITU; 2024. Available from: <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>
15. Rolnick D, Donti PL, Kaack LH, Kochanski K, Lacoste A, Sankaran K, et al. Tackling climate change with machine learning. *ACM Comput Surv*. 2022;55(2):42. <https://doi.org/10.1145/3485128>
16. Tomlinson B, Black RW, Patterson DJ, Torrance AW. The carbon emissions of writing and illustrating are lower for AI than for humans. *Sci Rep*. 2024;14:3732. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54271-x>
17. Zhao J. Artificial intelligence and sustainable decisions. *Eur Bus Organ Law Rev*. 2023;24:1-39. <https://doi.org/10.1007/s40804-022-00262-2>
18. Francisco M, Linnér BO. AI and the governance of sustainable development: an idea analysis of the European Union, the United Nations, and the World Economic Forum. *Environ Sci Policy*. 2023;150:103590. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.103590>
19. Batool A, Zowghi D, Bano M. AI governance: a systematic literature review. *AI Ethics*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s43681-024-00653-w>
20. Pagallo U. On twelve shades of green: assessing the levels of environmental protection in the Artificial Intelligence Act. *Minds Mach*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11023-025-09713-4>
21. México. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Artículo 4. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>
22. México. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
23. México. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
24. UNESCO. Recomendación sobre la ética de la inteligencia artificial. París: UNESCO; 2021. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137_spa
25. Unión Europea. Reglamento (UE) 2024/1689 por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial. Diario Oficial de la Unión Europea. 2024. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj>
26. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe. Santiago: CEPAL; 2018. Disponible en: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/43595>

FUNDING:

Los autores declaran que este estudio no recibió ningún tipo de financiación externa por parte de agencias públicas, privadas, ni de organizaciones sin ánimo de lucro. Todas las actividades de investigación, análisis y desarrollo fueron realizadas con recursos propios.

CONFLICT OF INTEREST:

Los autores afirman que no existen conflictos de intereses en este estudio y que se han seguido éticamente los procesos establecidos por esta revista. Además, aseguran que este trabajo no ha sido publicado parcial ni totalmente en ninguna otra revista.

AUTHOR CONTRIBUTION

Autor: Nestor Uriostegui Díaz (NUD), María Guadalupe Valenzo Salgado (MGVS)

1. Conceptualización: (NUD) (MGVS)
2. Curación de datos: (NUD) (MGVS)
3. Análisis formal: (NUD) (MGVS)
4. Adquisición de fondos:
5. Investigación: (NUD) (MGVS)
6. Metodología: (NUD) (MGVS)
7. Administración del proyecto:
8. Recursos:
9. Software: (NUD) (MGVS)
10. Supervisión: (NUD) (MGVS)
11. Validación: (NUD) (MGVS)
12. Visualización: (NUD) (MGVS)
13. Redacción – borrador original: (NUD) (MGVS)
14. Redacción – revisión y edición: (NUD) (MGVS)